



MAPEAMENTO DE SENSORES PARA DIAGNOSE DE FALHAS DE  
SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS: UMA ABORDAGEM INSPIRADA NA  
ESPECIFICAÇÃO DE LINGUAGENS

Victor Hugo Almeida Cruz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Lilian Kawakami Carvalho  
João Carlos dos Santos Basilio

Rio de Janeiro  
Março de 2020

MAPEAMENTO DE SENSORES PARA DIAGNOSE DE FALHAS DE  
SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS: UMA ABORDAGEM INSPIRADA NA  
ESPECIFICAÇÃO DE LINGUAGENS

Victor Hugo Almeida Cruz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientadores: Lilian Kawakami Carvalho  
João Carlos dos Santos Basilio

Aprovada por: Prof. Lilian Kawakami Carvalho  
Prof. João Carlos dos Santos Basilio  
Prof. Julia Lima Fleck  
Prof. Antônio Eduardo Carrilho da Cunha

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2020

Hugo Almeida Cruz, Victor

Mapeamento de Sensores para diagnose de falhas de sistemas a eventos discretos: uma abordagem inspirada na especificação de linguagens/Victor Hugo Almeida Cruz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XVIII, 158 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Lilian Kawakami Carvalho

João Carlos dos Santos Basilio

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 109 – 112.

1. Sistemas a Eventos Discretos. 2. Autômatos. 3. Mapeamento de Sensores. 4. Diagnose de Falhas. 5. Unidade de Separação Trifásica. I. Kawakami Carvalho, Lilian *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico este trabalho ao meu pai  
(in memoriam), à minha mãe, à  
minha esposa e aos meus irmãos.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai, quem guia meu caminho sempre. Aos meus pais José Lino (*in memoriam*) e Maria Neusa, pelo amor, dedicação e suporte para que eu pudesse seguir em frente.

Agradeço aos meus irmãos Luiz Felipe Cruz, Ismael Cruz, Priscilla Cruz e Juarez Albuquerque pela amizade mais pura e sincera e por todos os ensinamentos sobre a vida que vocês me passaram.

Agradeço à minha esposa Raissa Cruz, por todo amor, torcida e compreensão dos meus momentos de ausência durante a execução deste trabalho. Te Amo!

Agradeço aos meus orientadores Prof. João C. Basilio e Prof. Lilian K. Carvalho pela amizade, paciência e preciosas contribuições para a produção desta dissertação.

Meus agradecimentos às pessoas especiais e amigas que me brindaram com sua companhia, apoio moral e amizade durante o mestrado: Antônio Galiza, Gustavo Vianna, Guilherme Avelino, Jéssica Vieira, Marcos Vinicius, Maria Zeneide e Wesley Silva.

Ao Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) pela oportunidade de realizar esse trabalho em tempo parcial. Agradeço pelos ensinamentos e companheirismo durante as atividades cotidianas do IPqM ao CMG(RM1) Da Mota, CMG(RM1) Andrada, CC(T) Rui Rodrigues, CC(EN) Barbosa, CC(EN) Kleberon, CC(EN) Lázaro, CT(EN) Vinícius, CT(EN) Danilo Amaral, CT(EN) Edinaldo Maia, CT(EN) Tostes, 1T(RM2-EN) Ferreira, Alessandro Marino, Maurício Lemme, Paulo Vinícius, Waldemar dos Santos (Júnior) e Vitor Ribas.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MAPEAMENTO DE SENSORES PARA DIAGNOSE DE FALHAS DE  
SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS: UMA ABORDAGEM INSPIRADA NA  
ESPECIFICAÇÃO DE LINGUAGENS

Victor Hugo Almeida Cruz

Março/2020

Orientadores: Lilian Kawakami Carvalho  
João Carlos dos Santos Basilio

Programa: Engenharia Elétrica

A diagnose de falhas de grandes e complexos sistemas é uma tarefa crucial e desafiadora. O aumento do nível de exigência em relação aos requisitos de desempenho e segurança tem feito com que esforços sejam concentrados no desenvolvimento de métodos sofisticados e sistêmicos para elevar a precisão de sistemas de diagnóstico de falhas. A aplicação da diagnose de falhas requer o desenvolvimento de um modelo que contempla o comportamento normal e de falha do sistema. Uma das ferramentas utilizadas para isso é o chamado Mapeamento de Sensores (MS), que permite a modelagem de sistemas físicos por meio de autômatos. Porém a aplicação prática e direta do MS pode acarretar perda de precisão na estimação dos estados do sistema monitorado por conta do agrupamento das informações associadas a comando e leitura em um mesmo evento. Nesta dissertação é proposto um novo método, o Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL), que combina o mapa de sensores do MS com as especificações de linguagens usualmente utilizadas em controle supervísório de Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) para obter autômatos que modelam o comportamento dos sensores do sistema. A validação do MS-IEL foi realizada aplicando-o na construção de modelos para um sistema de diagnose de falhas de um unidade de separação trifásica para a produção de petróleo. Embora o método proposto neste trabalho tenha como motivação principal a diagnose de falhas de SEDs ele também pode ser utilizado para o desenvolvimento de modelos em SEDs com outros propósitos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SENSOR MAP FOR FAILURE DIAGNOSIS OF DISCRETE EVENT  
SYSTEMS: AN APPROACH INSPIRED BY LANGUAGE SPECIFICATION

Victor Hugo Almeida Cruz

March/2020

Advisors: Lilian Kawakami Carvalho  
João Carlos dos Santos Basilio

Department: Electrical Engineering

Fault diagnosis of large and complex systems is a challenging and crucial task. The increased level of demand about performance and safety requirements has meant that efforts are concentrated on the development of sophisticated and systemic methods to increase the accuracy of fault diagnosis systems. The application of fault diagnosis requires the development of a model that encompasses both the normal and fault behavior of the system. One of these methods is the so-called Sensor Mapping (SM), that allows the modeling of Discrete Event Systems (DES) using automata. However, the practical and direct application of the SM may result in loss of precision in the estimation of the monitored system states due to the merge of command and reading the information in the same event. In this dissertation, a new methodology, is proposed: the Sensor Mapping Inspired by Language Specification (SM-ILS), that combines SM with language specifications usually used in the supervisory control of DES to obtain automaton models. In order to validate the proposed method, the SM-ILS is applied to build discrete event models for the failure diagnosis of a real three-phase separation system for oil production. Although the proposed method has been developed for diagnosis of SEDs, it can also be used to develop discrete event models for other purposes.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>4</b>
2.1 Sistemas a Eventos Discretos . . . . .	4
2.2 Linguagem . . . . .	5
2.2.1 Operações sobre Linguagens . . . . .	6
2.3 Autômato . . . . .	8
2.3.1 Linguagens Representadas por Autômatos . . . . .	9
2.3.2 Composição Paralela . . . . .	10
2.4 Autômato Não Determinístico . . . . .	12
2.5 Autômato com Observação Parcial . . . . .	14
2.6 Representação de Autômatos com Entradas e Saídas . . . . .	16
2.7 Diagnose de Falhas de Sistemas a Eventos Discretos . . . . .	21
2.7.1 Diagnosticabilidade de Falhas em SED . . . . .	22
2.7.2 Diagnosticador $G_{scc}$ . . . . .	22
2.8 Mapeamento de Sensores . . . . .	27
2.9 Especificação de Linguagens . . . . .	33
2.10 Conclusões do Capítulo . . . . .	34
<b>3 Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL)</b>	<b>35</b>
3.1 Arquitetura da Modelagem Modular Utilizando o MS-IEL . . . . .	35
3.2 Desmembramento de Estados do MS-IEL . . . . .	38
3.3 Criação de Estados do MS-IEL . . . . .	45

3.4	Aplicação do MS-IEL a um Sistema de Aquecimento . . . . .	54
3.5	Conclusões do Capítulo . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Aplicação do MS-IEL para a Diagnose de Falhas de uma Unidade de Separação Trifásica</b>	<b>61</b>
4.1	Unidade de Separação Trifásica . . . . .	61
4.2	Modelos Dinâmicos de Variáveis Contínuas da Unidade de Separação Trifásica . . . . .	64
4.2.1	Comportamento Integrado do Processo . . . . .	66
4.3	Modelo do Diagnosticador em SED para a Unidade de Separação Trifásica . . . . .	72
4.3.1	Modelagem dos Componentes Ativos da UST: Válvulas . . . . .	74
4.3.2	Aplicação do MS-IEL na Unidade de Separação Trifásica . . . . .	75
4.3.3	Autômato do Controlador $G_c$ . . . . .	77
4.3.4	Gerador de Eventos . . . . .	80
4.3.5	Diagnosticador <i>Online</i> $G_d$ . . . . .	80
4.4	Simulações e Resultados . . . . .	81
4.4.1	Diagnóstico de Falhas com Fluxo de Alimentação Constante . . . . .	81
4.4.2	Diagnóstico de Falhas com Fluxo de Alimentação em Padrão de Golfadas . . . . .	98
4.5	Conclusões do Capítulo . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>106</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>109</b>
<b>A</b>	<b>Modelo do Vaso Separador da Unidade de Separação Trifásica</b>	<b>113</b>
<b>B</b>	<b>Modelo do Hidrociclone da Unidade de Separação Trifásica</b>	<b>118</b>
<b>C</b>	<b>Modelo Integrado da Unidade de Separação Trifásica</b>	<b>120</b>
<b>D</b>	<b>Controladores <math>PI</math> da Unidade de Separação Trifásica</b>	<b>122</b>
<b>E</b>	<b>Autômato Desmembrado (<math>G_{db_1}</math>)</b>	<b>124</b>
<b>F</b>	<b>Autômato Sensor (<math>G_s</math>)</b>	<b>127</b>
<b>G</b>	<b>Autômato do Controlador <math>G_c</math></b>	<b>134</b>
<b>H</b>	<b>Autômato <math>G</math> da UST</b>	<b>136</b>
<b>I</b>	<b>Autômato <math>G_d</math> da UST para a falha da válvula travada-aberta</b>	<b>148</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama de transição de estados do autômato $G$ do exemplo 2.4. . . . .	9
2.2	Autômatos $G_1$ e $G_2$ do exemplo 2.5. . . . .	11
2.3	Autômato $G_1    G_2$ do exemplo 2.5. . . . .	11
2.4	Autômato não determinístico do exemplo 2.6. . . . .	12
2.5	Autômato não determinístico do exemplo 2.7. . . . .	13
2.6	Autômato $G$ com evento não observável do exemplo 2.8. . . . .	14
2.7	Autômato $G$ do exemplo 2.9. . . . .	16
2.8	Autômato $Obs(G)$ do exemplo 2.9. . . . .	17
2.9	Autômatos com entradas e saídas. . . . .	17
2.10	Modelagem e transformação em autômato de <i>Moore</i> e de <i>Mealy</i> . . . . .	18
2.11	Arranjo dos componentes do exemplo 2.10. . . . .	19
2.12	Autômatos que modelam os componentes ativos do exemplo 2.10. . . . .	19
2.13	Autômatos $\tilde{G}$ , <i>Moore</i> e <i>Mealy</i> do exemplo 2.10. . . . .	20
2.14	Autômato rotulador $A_l$ . . . . .	23
2.15	Autômato $G$ do exemplo 2.11. . . . .	24
2.16	Autômato $G_l$ do exemplo 2.11. . . . .	25
2.17	Diagnosticador $G_d$ do exemplo 2.11. . . . .	25
2.18	Autômato $G_{scc}$ do exemplo 2.11. . . . .	25
2.19	Autômato $G$ do exemplo 2.12. . . . .	26
2.20	Autômato $G_{scc}$ do exemplo 2.12. . . . .	26
2.21	Arquitetura da modelagem de SED utilizando o MS. . . . .	27
2.22	Autômato $G_{Vf}$ . . . . .	29
2.23	Autômato $\tilde{G}_{aqf} = G_{Bomba}    G_{Controlador}    G_{Vf}$ . . . . .	30
2.24	Autômato $G_{aqf}$ , resultado da aplicação do MS a partir de $\tilde{G}_{aqf}$ da figura 2.23 e do MDS da tabela 2.5 (exemplo 2.12). . . . .	31
2.25	Autômato $G_{d,aqf}$ , resultado do exemplo 2.12. . . . .	31
2.26	Autômato $G_{scc,aqf}$ do exemplo 2.12. . . . .	32
3.1	Arquitetura da modelagem modular de SED utilizando o MS-IEL. . . . .	36
3.2	Sistema simplificado composto por um tanque, uma válvula e um transdutor de nível. . . . .	36

3.3	Módulos do MS-IEL. . . . .	37
3.4	Autômato $\tilde{G}$ . . . . .	38
3.5	Resultado parcial do autômato $G_{db_1}$ até o passo 22 do algoritmo 3.1 no exemplo 3.1. . . . .	43
3.6	Resultado parcial do autômato $G_{db_1}$ até o passo 32 do algoritmo 3.1 no exemplo 3.1. . . . .	43
3.7	Autômato $G_{db_1}$ final do exemplo 3.1. . . . .	44
3.8	Autômato $G_{db_1}$ final do exemplo 3.1. . . . .	47
3.9	Parcial do autômato $G_{s_1}$ após alterações do item 2 (em azul). . . . .	49
3.10	Autômato $G_{s_1}$ parcial após alterações dos itens 2 (em azul) e 3 (em verde). . . . .	50
3.11	Autômato $G_{s_1}$ parcial após alterações dos itens 2 (em azul), 3 (em verde) e 4 (em laranja). . . . .	51
3.12	Autômato $G_{s_1}$ final. . . . .	52
3.13	Autômato $G_{s_1}$ final após renomeação dos estados. . . . .	52
3.14	Autômato $G = G_{s_1}    \tilde{G}$ do exemplo 3.3. . . . .	53
3.15	Autômato $\tilde{G}_{aqf} = G_{Bomba}    G_{Controlador}    G_{Vf}$ . . . . .	54
3.16	Autômatos que modelam o comportamento dos sensores. . . . .	56
3.17	Autômato $G$ . . . . .	58
3.18	Autômato $G_d$ . . . . .	59
3.19	Autômato $G_{scc}$ . . . . .	59
4.1	Esquema simplificado do processamento primário de fluidos. . . . .	62
4.2	Unidade de Separação Trifásica. . . . .	63
4.3	Estrutura interna do vaso separador. . . . .	64
4.4	Modelo do $i$ -ésimo hidrociclone. . . . .	65
4.5	Respostas das variáveis controladas às alterações nos <i>setpoints</i> . . . . .	67
4.6	Respostas das variáveis manipuladas às alterações nos <i>setpoints</i> . . . . .	68
4.7	Respostas das variáveis controladas às alterações na entrada. . . . .	70
4.8	Respostas das variáveis manipuladas às alterações na entrada. . . . .	71
4.9	Arquitetura do diagnosticador implementado na UST. . . . .	73
4.10	Modelagem do autômato $G$ da UST. . . . .	73
4.11	Autômato $G_v$ que modela o comportamento da válvula. As descrições dos seus estados e eventos estão apresentadas na tabela 4.4. . . . .	75
4.12	Autômato $G_{c1}$ . . . . .	79
4.13	Autômato $G_{c2}$ . . . . .	79
4.14	Autômato $G_{c3}$ . . . . .	79
4.15	Gerador de eventos. . . . .	80

4.16	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_o$ .	82
4.17	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_o$ .	83
4.18	Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula $S_o$ .	83
4.19	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_o$ .	84
4.20	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_o$ .	84
4.21	Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula $S_o$ .	85
4.22	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_{w_3}$ .	86
4.23	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_{w_3}$ .	87
4.24	Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula $S_{w_3}$ .	88
4.25	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_{w_3}$ .	88
4.26	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_{w_3}$ .	89
4.27	Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula $S_{w_3}$ .	89
4.28	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_g$ .	90
4.29	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_g$ .	91
4.30	Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula $S_g$ .	91
4.31	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_g$ .	92
4.32	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_g$ .	92
4.33	Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula $S_g$ .	93
4.34	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_{o_3}$ .	94
4.35	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_{o_3}$ .	95
4.36	Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula $S_{o_3}$ .	96
4.37	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_{o_3}$ .	96
4.38	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_{o_3}$ .	97

4.39	Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula $S_{o_3}$ . . . . .	97
4.40	Fluxo de golfadas nas entradas. . . . .	98
4.41	Variáveis controladas para alimentação em padrão golfadas. . . . .	100
4.42	Variáveis manipuladas para alimentação em padrão golfadas. . . . .	101
4.43	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	101
4.44	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	102
4.45	Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	102
4.46	Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	103
4.47	Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	103
4.48	Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula $S_o$ para alimentação em fluxo de golfadas. . . . .	104
A.1	Vaso separador. . . . .	113
B.1	Modelo do $i$ – <i>ésimo</i> hidrociclone. . . . .	119

# Lista de Tabelas

2.1	Estados e eventos do autômato da bomba ( $G_{\text{Bomba}}$ ) do exemplo 2.10.	20
2.2	Estados e eventos do autômato da válvula ( $G_{\text{Válvula}}$ ) do exemplo 2.10.	20
2.3	Estados do autômato do controlador ( $G_{\text{Controlador}}$ ) do exemplo 2.10.	20
2.4	Comportamento dos sensores para o autômato $\tilde{G}_{aq}$ do exemplo 2.10.	20
2.5	MDS para o autômato $\tilde{G}_{aqf}$ .	29
3.1	MDS para o autômato $\tilde{G}$ da figura 3.4.	38
3.2	$MDS_{db_1}$ parcial para o autômato $G_{db_1}$ da figura 3.5 até o passo 22 do algoritmo 3.1.	42
3.3	$MDS_{db_1}$ parcial para o autômato $G_{db_1}$ da figura 3.6 até o passo 32 do algoritmo 3.1.	44
3.4	$MDS_{db_1}$ final para o autômato $G_{db_1}$ da figura 3.7.	44
3.5	$MDS_{db_1}$ final para o autômato $G_{db_1}$ da figura 3.8.	48
3.6	MDS para o autômato $\tilde{G}_{aqf}$ .	55
4.1	Varição no <i>setpoint</i> .	66
4.2	Tempo de acomodação das variáveis.	69
4.3	Varição nas variáveis de entrada.	69
4.4	Estados e eventos do autômato $G_v$ que modela o comportamento da válvula.	74
4.5	MDS para o autômato $\tilde{G}$ que modela o comportamento das válvulas $S_o$ , $S_{w_3}$ e $S_g$ .	76
4.6	MDS para o autômato $\tilde{G}$ que modela o comportamento da válvula $S_{o_3}$ .	77
4.7	$MDS_{db_1}$ para o autômato $G_{db_1}$ .	78
4.8	Síntese dos tempos de diagnóstico das falhas para cada válvula.	95
A.1	Variáveis de estado do separador.	115
A.2	Parâmetros do separador.	116
A.3	Variáveis do processo.	116
A.4	Variáveis de entrada e saída do separador.	117
A.5	Variáveis de controle do separador.	117

B.1	Variáveis do hidrociclone. . . . .	119
B.2	Parâmetros da série de hidrociclones BOW, PDC e DC. . . . .	119
C.1	Valores de <i>setpoint</i> das malhas de controle . . . . .	120
C.2	Variáveis manipuladas do sistema de controle do separador . . . . .	121
D.1	Parâmetros dos controladores PI . . . . .	123
E.1	Autômato Desmembrado $G_{db_1}$ . . . . .	124
F.1	Autômato Sensor $G_s$ . . . . .	127
G.1	Autômato Controlador $G_c$ . . . . .	134
H.1	Autômato $G$ da UST . . . . .	136
I.1	Autômato $G_d$ da UST . . . . .	148

# Lista de Símbolos

$K_{c_i}$	Ganho proporcional para a malha $i$ , p. 145
$L(G)$	Linguagem Gerada pelo automato $G$ , p. 9
$L^*$	Fecho de Kleene de uma linguagem $L$ , p. 6
$L_m(G)$	Linguagem marcada pelo automato $G$ , p. 9
$Obs(G)$	Observador do autômato $G$ , p. 13
$P$	Operação de projeção natural, p. 7
$P^{-1}$	Operação de projeção inversa, p. 7
$V_{osc}(t)$	Volume de óleo na fase aquosa na CS, p. 138
$V_{voc}(t)$	Volume de água na fase oleosa na CO, p. 138
$V_{wsc}(t)$	Volume de água na fase oleosa na CS, p. 138
$X$	Conjunto de estados de um autômato, p. 8
$X_m$	Conjunto dos estados marcados, p. 8
$\Gamma$	Função de eventos ativos, p. 8
$\Sigma_o$	Conjunto de eventos observáveis, p. 13
$\Sigma_{uo}$	Conjunto de eventos não observáveis, p. 13
$\Sigma$	Conjunto de eventos, p. 5
$\Sigma^*$	Fecho de Kleene de $\Sigma$ , p. 6
$\Sigma_f$	Conjunto de eventos de falha, p. 21
$\bar{L}$	Fecho de prefixo de uma linguagem $L$ , p. 6
$\dot{\cup}$	União de conjuntos disjuntos, p. 13

$\sigma_f$	Evento de falha, p. 21
$\tau_i$	Constante de tempo integral da malha $i$ , p. 145
$\varepsilon$	Sequência vazia, p. 5
$e_i$	Sinal de erro da malha $i$ , p. 145
$f$	Função de transição de estados, p. 8
$f_{nd}^{ext}$	Função não determinística estendida, p. 12
$f_{nd}$	Função não determinística, p. 12
$h_o(t)$	Nível do óleo na CO, p. 138
$h_t(t)$	Nível total da mistura na CS, p. 138
$h_w(t)$	Nível da água na CS, p. 138
$p(t)$	Pressão de Gás no separador, p. 138
$t$	Prefixo de $s$ , p. 6
$u$	Subsequência de $s$ , p. 6
$u_i$	Saída do controlador da malha $i$ , p. 145
$v$	Sufixo de $s$ , p. 6
$x_0$	Estado inicial, p. 8
$s$	Sequência de eventos, p. 5

# Lista de Abreviaturas

BOWC	Bulk Oil-Eater Cyclone, p. 61
CFC	Componente fortemente conexa, p. 23
CO	Câmara de Óleo, p. 63
CS	Câmara de Separação, p. 63
DC	Deoiler Cyclone, p. 61
MS-IEL	Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens, p. 2
MS	Mapeamento de Sensores, p. 26
PDC	Pre Deoiler Cyclone, p. 61
PI	Proporcional-Integral, p. 64
SEDs	Sistemas a Eventos Discretos, p. 1
UST	Unidade de Separação Trifásica, p. 60
MDS	Mapa de Sensores, p. 27

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas industriais automatizados possuem componentes inteligentes com funções de controlar e monitorar a planta em tempo real. O aumento da complexidade desses sistemas e da exigência em relação aos requisitos de desempenho e segurança dos processos têm feito com que grandes esforços sejam realizados em pesquisas e desenvolvimentos de sistemas sofisticados que possuam a capacidade de diagnosticar falhas.

As falhas são capazes de provocar distúrbios significativos ao sistema levando o processo para um ponto longe da sua faixa normal de operação, no qual o dispositivo de controle não consegue regular eficientemente as variáveis. Se essa situação não for corrigida por uma ação adequada, a operação poderá entrar numa situação emergencial com consequências catastróficas. Nesse sentido, a implementação da diagnose de falhas está baseada em três pilares: a detecção, o isolamento e a identificação da falha. A detecção é uma funcionalidade que decide se o sistema está operando em condições normais ou se alguma falha ocorreu. Se determinada falha ocorreu, o isolamento localiza os componentes do sistema que falharam. Já a identificação está preocupada com a natureza da falha[1].

A diagnose de falhas em Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) tem sido bastante explorada nos últimos anos [1–8, 8–11]. Uma das razões para esse interesse é que o formalismo da modelagem de sistemas discretos pode ser aplicado também a sistemas dinâmicos de variáveis contínuas. O problema da diagnose de falhas foi trazido para o contexto de SEDs por LIN [12], que introduziu o conceito da capacidade de se diagnosticar a ocorrência de uma falha em um sistema, utilizando um autômato de *Mealy* para modelar o comportamento de falhas em circuitos. Logo a seguir, SAMPATH *et al.* [8] apresentaram condições necessárias e suficientes para a diagnose de falhas de SEDs e propuseram a construção de um autômato diagnosticador a partir do modelo a eventos discretos, que deve abranger tanto o comportamento normal como o de falha. O diagnosticador permite inferir sobre a capacidade de detectar as falhas presentes no sistema e pode ser usado para realizar a diagnose de

falhas em tempo real.

Em um trabalho correlacionado, SAMPATH *et al.* [11] consideraram o problema do desenvolvimento de modelos a eventos discretos para a diagnose de falhas. Nesse trabalho foi apresentado um procedimento sistemático para gerar um modelo composto que captura a interação entre os componentes e incorpora nele as informações provenientes dos sensores. Esse método foi denominado de Mapeamento de Sensores (MS). O MS renomeia os eventos do sistema no processo de incorporação das informações dos sensores ao modelo, fazendo com que os sinais de comando, que são provenientes de um supervisor ou coordenador, fiquem agrupados com os sinais emitidos pelos sensores da planta. Essa característica demanda alguns cuidados nas aplicações práticas. Um deles é a necessidade de se realizar um tratamento analítico dos sinais lidos da planta para que eles sejam traduzidos para o conjunto de eventos com as mesmas características do modelo a eventos discretos. Outro fato que merece atenção no MS é a perda da precisão na estimação do estado atual da planta, o que pode ocasionar em detecção de falhas que não aconteceram (falso-positivo).

Em [13], o MS foi estendido para ser compatível com Redes de Petri e foi aplicado em um processo de produção de petróleo em plataforma marítima. Em [14], o MS foi adaptado para que os eventos indicadores de falhas fossem inseridos ao modelo como prefixo dos eventos de falhas. Os diagnosticadores obtidos a partir desse modelo foram aplicados a um processo de separação trifásica água-óleo-gás. Esses dois trabalhos foram bem sucedidos na diagnose em tempo real, mas a inserção de um novo grau de abstração para os eventos dificulta a utilização direta do modelo obtido em outras aplicações.

Em [15] foi considerada uma abordagem para a diagnose *online* de falhas de sistemas modelados por autômatos baseada em estados, na qual o diagnosticador não precisa ser iniciado junto com o sistema e possui as leituras dos sensores em seus estados. Porém, essa abordagem não permite a computação da base mínima de sensores para a diagnose conforme foi explorada em [16], pois não possui as informações dos sensores nos eventos.

Outros trabalhos que se baseiam na modelagem de sistemas a eventos discretos como o diagnóstico robusto [4, 10], o diagnóstico descentralizado [5, 6, 9], o diagnóstico descentralizado robusto [3] e a computação da base mínima de sensores para a diagnose [16], são aplicados aos autômatos partindo do princípio que os eventos gerados pelos sensores estão desacoplados dos eventos de comando da coordenação, fato que não acontece com a aplicação do MS.

Neste trabalho, é proposto o método de Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL). A concepção do MS-IEL partiu das seguintes premissas: (i) a dissociação entre os sinais dos sensores e os comandos enviados para a planta; (ii) e a simplicidade na implementação prática dos modelos

obtidos. O MS-IEL combina o mapa de sensores do MS com as especificações de linguagens, usualmente utilizada no controle supervisorio de SEDs, para obter os autômatos que modelam o comportamento dos sensores. Para validar o MS-IEL ele será aplicado no desenvolvimento de um modelo por eventos discretos de um sistema automático de diagnose de falhas para uma Unidade de Separação Trifásica (UST) óleo-água-gás. O processo baseia-se em simulações do projeto real de uma plataforma de produção da PETROBRAS instalada no campo de Marlin, na Bacia de Campos [17]. Neste sistema são consideradas falhas das válvulas nas posições travada-aberta e travada-fechada em que são aplicados os diagnosticadores obtidos e é avaliado o seu desempenho. Além disso, na modelagem em SEDs, com a aplicação MS-IEL da UST, são propostas especificações para o comportamento do sistema realimentado que resulta em um modelo mais fidedigno com os resultados da simulação da planta.

Esta Dissertação está estruturada da seguinte forma. No capítulo 2 são revistos os principais conceitos de SEDs, diagnose de falhas e Mapeamento de Sensores. A apresentação do MS-IEL é realizada no capítulo 3, juntamente com a sua arquitetura, a descrição de seus módulos e a exemplificação da sua aplicação. No capítulo 4 é descrito o processo da UST, são construídos os diagnosticadores a partir da aplicação do MS-IEL e o seu desempenho é analisado por meio de simulações. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas propostas para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão sobre os conceitos básicos da teoria de SEDs. Na seção 2.1 apresenta-se o significado de SEDs. Na sequência, alguns conceitos sobre a teoria de linguagens são apresentados na seção 2.2. Nas seções 2.3, 2.4 e 2.5 são descritas as teorias dos autômatos, essenciais para o entendimento desta dissertação. As seções 2.1 a 2.5 foram feitas com base em [6]. Conceitos sobre a diagnose de falhas, o mapeamento de sensores e a especificação de linguagens são descritos nas seções 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente.

### 2.1 Sistemas a Eventos Discretos

Ao longo da história, cientistas e engenheiros têm desenvolvido técnicas e aprofundado estudos sobre os fenômenos naturais. O conceito mais básico e essencial para descrever um fenômeno é o de sistemas, o qual pode ser descrito como um conjunto de componentes que interagem para realizar determinada função. Os sistemas dinâmicos, que são representados por variáveis de espaços de estados contínuos, como por exemplo, os deslocamentos, as velocidades, a aceleração de partículas, as pressões, as temperaturas, o fluxo de fluidos e gases e etc, que podem assumir qualquer valor real ao longo da escala do tempo requerem ferramentas matemáticas robustas e complexas, como as equações diferenciais ordinárias e parciais, para sua modelagem, análise e controle.

Com o avanço tecnológico verificado nos dias atuais em que há grande dependência dos computadores, tendo as indústrias alcançado elevados níveis de automação, pode-se notar duas coisas: a primeira é que muitas das grandezas são *discretas*, ou seja, envolvem números conjuntos enumeráveis, como por exemplo, quantas peças estão armazenadas, quantos aviões estão em um hangar, quantos tanques estão cheios e etc; a segunda é que muitos processos têm a sua evolução regida pelo ocorrência de *eventos* instantâneos, como por exemplo, apertar um botão, selecionar o modo de operação de uma máquina ou uma peça atingir uma

determinada posição na linha de produção. Nesse sentido, quando um sistema possui espaço de estados descrito por um conjunto discreto e as transições de estados ocorrem devido à ocorrência de eventos, chamamos esse sistema de Sistema a Eventos Discretos (SED)

A modelagem de um SED deve ser capaz de reproduzir, dentro dos limites de tolerância pré-estabelecidos, o comportamento do sistema. As trajetórias dos estados são descritas em função de uma sequência de eventos. Todas as sequências de eventos possíveis de serem geradas por um SED caracterizam a sua linguagem. Para descrever o comportamento de um SED é necessário conhecer as sequências de eventos que causam as transições de estados.

## 2.2 Linguagem

As teorias de linguagens e autômatos são algumas das maneiras formais de se estudar o comportamento lógico dos sistemas a eventos discretos. O ponto de partida é o fato de qualquer sistema a eventos discretos possuir um conjunto de eventos  $\Sigma$  associado a ele. O conjunto de eventos  $\Sigma$  pode ser entendido como um alfabeto e a sequência de eventos formada com os elementos de  $\Sigma$  pode ser entendida como uma palavra. Uma palavra ou sequência que não possui nenhum evento é chamada de sequência vazia sendo denotada por  $\varepsilon$ . O tamanho de uma sequência é baseado no número de eventos existentes nela, levando-se em consideração as múltiplas ocorrências de um mesmo evento. Se  $s$  é uma sequência, então o comprimento de  $s$  é denotado por  $|s|$ . Por convenção, o comprimento da sequência vazia  $\varepsilon$  é zero. O conceito de linguagem é apresentado a seguir.

**Definição 2.1 (Linguagem)** *Uma linguagem definida sobre um conjunto de eventos  $\Sigma$  é um conjunto de sequências de comprimento finito formadas com os eventos de  $\Sigma$ .*

**Exemplo 2.1** [6] *Os seguintes conjuntos são exemplos de linguagens definidas sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ :  $L_1 = \{\varepsilon, a, b, aacb\}$  e  $L_2 = \{\text{todas as possíveis sequências de eventos de } \Sigma \text{ terminadas com } b\}$ . Observe que  $L_1$  tem apenas 4 elementos e  $L_2$  contém um número infinito de sequências.*

A operação básica sobre os eventos é a concatenação, ela é utilizada para formar sequências. A sequência  $abc$  é a concatenação da sequência  $ab$  com o evento  $c$ , e a sequência  $ab$  é a concatenação do evento  $a$  com o evento  $b$ . O elemento identidade da concatenação é  $\varepsilon$ , então qualquer sequência concatenada com  $\varepsilon$  é a própria sequência, por exemplo,  $s\varepsilon = \varepsilon s = s$ .

Observe que uma linguagem é um subconjunto do conjunto de todas as sequências de comprimento finito possíveis de serem formadas com os elementos de  $\Sigma$ , incluindo a sequência vazia  $\varepsilon$ . A esse conjunto dá-se o nome de fecho de Kleene de  $\Sigma$ , que é denotado por  $\Sigma^*$ .

Para apresentar adequadamente as operações sobre linguagens, alguns conceitos e terminologias sobre sequências são descritos. Considere a sequência  $s = tuv$ , em que  $t, u, v \in \Sigma^*$ . Então,  $t$  é denominado prefixo de  $s$ ,  $u$  é denominado de subsequência de  $s$  e  $v$  é denominado de sufixo de  $s$ .

### 2.2.1 Operações sobre Linguagens

As operações de conjuntos, tais como união, interseção, diferença e complemento, são aplicáveis para linguagens definidas sobre o conjunto de eventos  $\Sigma$  uma vez que uma linguagem é um conjunto. A seguir, são apresentadas outras operações com linguagens [6].

**Concatenação** Sejam  $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$ . A concatenação entre  $L_a$  e  $L_b$  é uma linguagem  $L = L_a L_b$  formada concatenando-se todas as sequências de  $L_a$  com todas as sequências de  $L_b$ , isto é,

$$L = L_a L_b := \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \wedge (s_a \in L_a) \wedge (s_b \in L_b)\}.$$

**Fecho de prefixo** Seja  $L \subseteq \Sigma^*$ . Então o fecho de prefixo de uma linguagem  $L$ , denotado por  $\bar{L}$ , é o conjunto formado por todos os prefixos dos elementos de  $L$ , isto é,

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

Uma linguagem é dita ser prefixo-fechada se  $L = \bar{L}$ .

**Fecho de Kleene** Seja  $L \subseteq \Sigma^*$ , o fecho de Kleene de  $L$  é definido como:

$$L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup \dots$$

**Exemplo 2.2** Considere o conjunto de eventos  $\Sigma = \{a, b, c\}$ , e as linguagens  $L_1 =$

$\{\varepsilon, a, b\}$  e  $L_2 = \{bc\}$  definidas sobre  $\Sigma$ . Então:

$$L_1 L_2 = \{bc, abc, bbc\};$$

$$\bar{L}_1 = \{\varepsilon, a, b\};$$

$$\bar{L}_2 = \{\varepsilon, b, c, bc\};$$

$$L_1^* = \{\varepsilon, a, b, aa, ab, ba, bb, aaa, aab, aba, baa, abb, bab, bba\dots\};$$

$$L_2^* = \{\varepsilon, bc, bc bc, bc bc bc, bc bc bc bc, bc bc bc bc bc, \dots\}.$$

**Projeção Natural** Outra operação frequentemente utilizada em seqüências e linguagens é a projeção natural, ou simplesmente projeção, a partir de um conjunto de eventos maior,  $\Sigma_l$ , para um conjunto de eventos menor,  $\Sigma_s$ , no qual  $\Sigma_s \subset \Sigma_l$ . A projeção é definida por:

$$P : \Sigma_l^* \rightarrow \Sigma_s^*,$$

em que

$$P(\varepsilon) := \varepsilon;$$

$$P(e) := \begin{cases} e & \text{se } e \in \Sigma_s; \\ \varepsilon & \text{se } e \in \Sigma_l \setminus \Sigma_s; \end{cases}$$

$$P(se) := P(s)P(e) \text{ para } s \in \Sigma_l^*, e \in \Sigma_l.$$

A projeção pode ser estendida a linguagens a partir da aplicação da operação  $P$  a todas as seqüências da linguagem  $L$ . Logo:

$$P(L) := \{t \in \Sigma_s^* : (\exists s \in L_s)[P(s) = t]\}.$$

**Projeção Inversa** A projeção inversa é a operação inversa da projeção natural, isto é:

$$P^{-1} : \Sigma_s^* \rightarrow 2^{\Sigma_l^*}.$$

A projeção inversa é definida tanto para seqüências como para linguagens, e pode ser intuitivamente descrita como a operação que preenche uma seqüência com todas as seqüências possíveis que podem ter sido removidas durante a projeção natural entre os eventos e as seqüências. A definição matemática para a projeção inversa de  $L \subseteq \Sigma_s^*$  é:

$$P^{-1}(L_s) := \{s \in \Sigma_l^* : (\exists t \in L_s)[P(s) = t]\}.$$

**Exemplo 2.3** Dado um conjunto de evento  $\Sigma_l = \{a, b, c\}$ , um subconjunto  $\Sigma_s = \{a, b\}$ , a linguagem  $L_1 = \{a, abc, bcba\}$  definida sobre  $\Sigma_l$  e a linguagem  $L_2 = \{bba, ab\}$  definida sobre  $\Sigma_s$ , a projeção natural  $P : \Sigma_l^* \rightarrow \Sigma_s^*$  aplicada a  $L_1$  é dada por:

$$P(L_1) = \{a, ab, bba\}.$$

A projeção inversa de  $L_2$  é dada por:

$$P^{-1}(L_2) = \{\{c\}^*b\{c\}^*b\{c\}^*a\{c\}^*, \{c\}^*a\{c\}^*b\{c\}^*\}.$$

Uma linguagem deve ser entendida como uma maneira formal de descrever o comportamento de um SED, isto é, deve especificar todas as possíveis sequências de eventos que um SED é capaz de processar ou gerar. Contudo, nem sempre a representação de uma linguagem é fácil de especificar. É preciso um conjunto compacto de estruturas que definam linguagens e que possam ser manipuladas com operações bem definidas, permitindo, então, manipular e analisar, linguagens complexas. O modelo adotado nesta dissertação para descrever SEDs é o autômato, que será apresentado a seguir.

## 2.3 Autômato

Um autômato é um dispositivo capaz de representar linguagens de acordo com regras bem definidas.

**Definição 2.2 (Autômato Determinístico)** *Um autômato determinístico, denotado por  $G$ , é uma sêxtupla*

$$G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m),$$

na qual,  $X$  é o conjunto de estados,  $\Sigma$  é o conjunto de eventos,  $f : X \times \Sigma \rightarrow X$  é a função de transição de estados,  $\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$  é a função de eventos ativos,  $x_0 \in X$  é o estado inicial e  $X_m \subseteq X$  é o conjunto dos estados marcados.

Os estados marcados se referem aos estados de  $X$ , aos quais se deseja dar um significado especial, como por exemplo, o término de uma tarefa.

Os autômatos são representados graficamente por meio de diagramas de transição de estados. Nesses diagramas, os estados são representados por circunferências; o estado inicial é indicado por uma seta apontada para este, enquanto os estados marcados são identificados por duas circunferências concêntricas. Os estados são

conectados entre si por meio de arcos direcionados com símbolos, que representam os eventos que determinam a mudança entre esses estados. Um autômato é mostrado no exemplo 2.4.

**Exemplo 2.4** *Seja o autômato  $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  em que  $X = \{0, 1, 2, 3\}$ ,  $\Sigma = \{a, b, c\}$ ,  $f(0, a) = \{0\}$ ,  $f(0, b) = \{1\}$ ,  $f(0, c) = \{2\}$ ,  $f(1, a) = \{3\}$ ,  $f(2, a) = \{3\}$ ,  $f(3, b) = \{3\}$ ,  $f(3, c) = \{2\}$ ,  $\Gamma(0) = \{a, b, c\}$ ,  $\Gamma(1) = \{a\}$ ,  $\Gamma(2) = \{a\}$ ,  $\Gamma(3) = \{b, c\}$ ,  $x_0 = \{0\}$ ,  $X_m = \{2, 3\}$ . Na figura 2.1 está apresentado o diagrama de transição de estados de  $G$ . Como pode ser observado, o estado inicial é o estado 0, os estados marcados são os estados 2 e 3 e as transições de estado são indicadas pelas setas rotuladas, como, por exemplo, a transição do estado 0 para o estado 1 que ocorre através do evento  $b$ .*

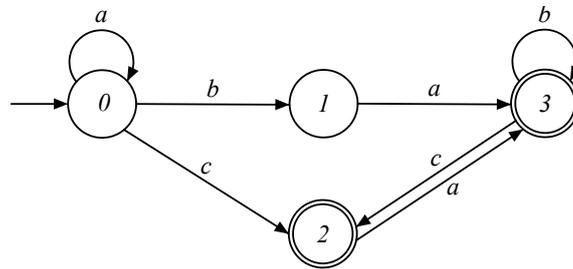


Figura 2.1: Diagrama de transição de estados do autômato  $G$  do exemplo 2.4.

### 2.3.1 Linguagens Representadas por Autômatos

De acordo com a seção anterior, autômatos são dispositivos capazes de representar linguagens que podem ser obtidas diretamente dos seus diagramas de transições. A seguir, serão apresentadas as definições de linguagem gerada e de linguagem marcada. Para tanto, é necessário estender a função  $f$  para o domínio  $X \times \Sigma^*$  da seguinte forma:  $f(x_0, \varepsilon) = x_0$ ,  $f(x_0, s\sigma) = f(f(x_0, s), \sigma)$ ,  $s \in \Sigma^*$  e  $\sigma \in \Sigma$ .

**Definição 2.3 (Linguagem Gerada)** *A linguagem gerada por um autômato  $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  é  $L(G) = \{s \in \Sigma^* : f(x_0, s) \text{ é definida}\}$ .*

A linguagem  $L(G)$  é o conjunto formado por todas as sequências que podem ser executadas no autômato  $G$ , a partir do seu estado inicial  $x_0$ .

Nota-se pela definição 2.3, que  $L(G)$  é prefixo-fechada. A linguagem marcada  $L_m(G)$  é um subconjunto de  $L(G)$ , e consiste somente nas sequências  $s$ , tais que  $f(x_0, s) \in X_m$ , isto é, as sequências que iniciam em  $x_0$  e terminam em um estado marcado. A linguagem marcada  $L_m(G)$  não é, em geral, prefixo-fechada. Formalmente, a linguagem marcada é definida da seguinte forma.

**Definição 2.4 (Linguagem Marcada)** *A linguagem marcada por um autômato  $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  é  $L_m(G) = \{s \in L(G) : f(x_0, s) \in X_m\}$ .*

### 2.3.2 Composição Paralela

A composição paralela é utilizada para construir um modelo complexo a partir dos modelos individuais dos seus componentes.

**Definição 2.5 (Composição Paralela)** *Sejam os autômatos  $G_1$  e  $G_2$ . A composição paralela de  $G_1$  e  $G_2$  é o autômato:*

$$G_1||G_2 := Ac(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f, \Gamma_{1||2}, (x_{01}, x_{02}), X_{m1} \times X_{m2}),$$

em que:

$$f((x_1, x_2), e) := \begin{cases} (f_1(x_1, e), f_2(x_2, e)), & \text{se } e \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2); \\ (f_1(x_1, e), x_2), & \text{se } e \in \Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2; \\ (x_1, f_2(x_2, e)), & \text{se } e \in \Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1; \\ \text{não definida,} & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Além disso,  $\Gamma_{1||2}(x_1, x_2) = [\Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2)] \cup [\Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2] \cup [\Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1]$ .

Na composição paralela, um evento pertencente a  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ , só pode ocorrer se for executado em ambos os autômatos simultaneamente. Dessa forma, os dois autômatos estão sincronizados. Os eventos privados de  $G_1$  e  $G_2$ , em um estado  $(x_1, x_2)$ , que são os eventos em  $[\Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2] \cup [\Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1]$ , não possuem essa limitação, podendo ocorrer sempre que for possível.

Para caracterizar as linguagens gerada e marcada por  $G_1||G_2$  é preciso definir as projeções  $P_i : (\Sigma_1 \cup \Sigma_2)^* \rightarrow \Sigma_i^*$ ,  $i = 1, 2$ . Utilizando essas projeções, as linguagens resultantes da composição paralela são caracterizadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} L(G_1||G_2) &= P_1^{-1}[L(G_1)] \cap P_2^{-1}[L(G_2)], \\ L_m(G_1||G_2) &= P_1^{-1}[L_m(G_1)] \cap P_2^{-1}[L_m(G_2)]. \end{aligned}$$

**Exemplo 2.5** Sejam  $G_1$  e  $G_2$  autômatos, cujos diagramas de transição de estados são apresentados, respectivamente, nas figuras 2.2 (a) e 2.2 (b). A composição paralela desses autômatos é representada pelo autômato  $G_1||G_2$ , mostrada na figura 2.3.

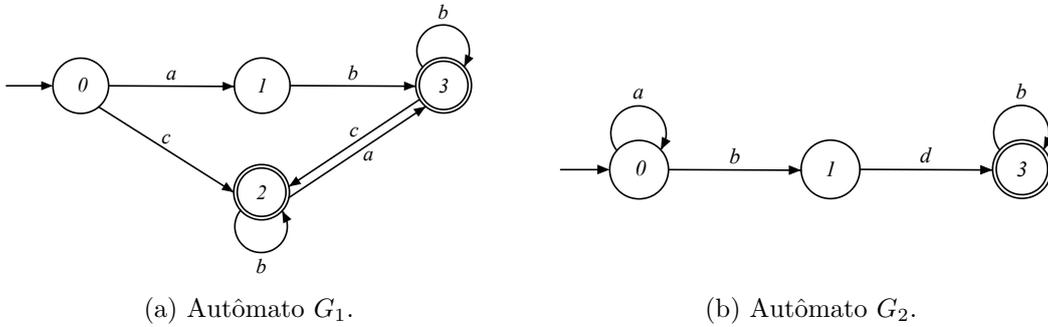


Figura 2.2: Autômatos  $G_1$  e  $G_2$  do exemplo 2.5.

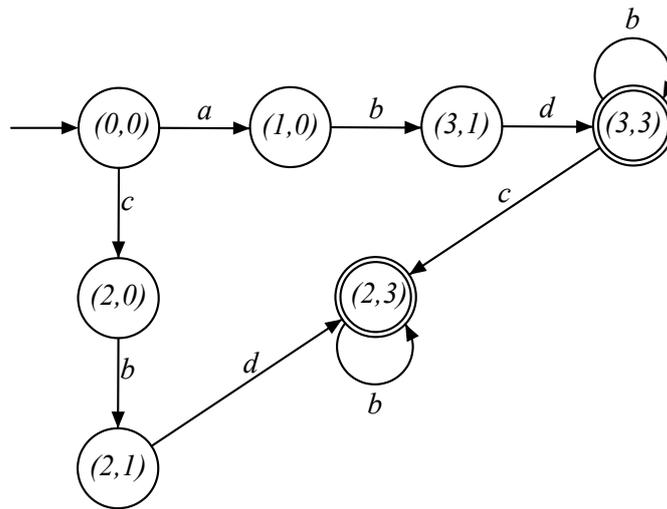


Figura 2.3: Autômato  $G_1||G_2$  do exemplo 2.5.

## 2.4 Autômato Não Determinístico

Autômatos determinísticos, definição 2.2, possuem três características fundamentais: (i) a primeira é que há somente um estado inicial; (ii) a segunda é que a função de transição é determinística, ou seja, se  $\sigma \in \Gamma(x)$ , então  $\sigma$  provoca uma transição de  $x$  para um único estado; e (iii) a última é que todas as transições são rotuladas por um evento  $\sigma \in \Sigma$ . Esses três requisitos são relaxados para um autômato não determinístico.

**Definição 2.6 (Autômato não Determinístico)** *Um autômato não determinístico, com transição  $\varepsilon$ , denotado por  $G_{nd}$ , é uma sêxtupla [18]:*

$$G_{nd} = (X, \Sigma \cup \{\varepsilon\}, f_{nd}, \Gamma, X_0, X_m)$$

em que todos os componentes são definidos como no autômato determinístico, exceto:

1.  $f_{nd} : X \times \Sigma \cup \{\varepsilon\} \rightarrow 2^X$ , ou seja,  $f_{nd}(x, \sigma) \subseteq X$  quando for definida;
2.  $X_0 \subseteq X$ , isto é, o estado inicial pode ser um conjunto.

A seguir são apresentados dois exemplos de autômatos não determinísticos.

**Exemplo 2.6** *Considere o autômato de estado finito da figura 2.4. O mapeamento das transições dos estados é:  $f_{nd}(0, b) = \{0, 1\}$  e  $f_{nd}(1, a) = \{0\}$ . As transições  $f_{nd}(0, a)$  e  $f_{nd}(1, b)$  não são definidas.*

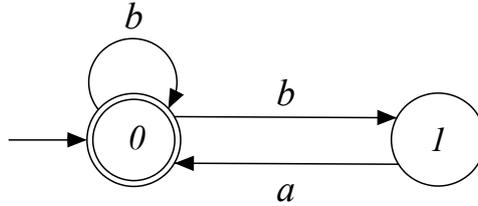


Figura 2.4: Autômato não determinístico do exemplo 2.6.

**Exemplo 2.7** *O autômato na figura 2.5 é não determinístico e inclui uma transição  $\varepsilon$ , sendo:  $f_{nd}(0, \varepsilon) = \{1\}$ ,  $f_{nd}(0, b) = \{2\}$ ,  $f_{nd}(1, a) = \{0\}$  e  $f_{nd}(2, a) = \{1\}$ . Suponha que, após o sistema iniciar, observa-se o evento  $a$ . A transição  $f_{nd}(0, a)$  não é definida. Pode-se concluir que aconteceu uma transição silenciosa rotulada pela palavra nula  $\varepsilon$  do estado 0 para o estado 1, seguido do evento  $a$ . Como o sistema pode evoluir novamente para o estado 1 sem gerar nenhum evento observável, haverá a dúvida se o sistema está no estado 0 ou no estado 1.*

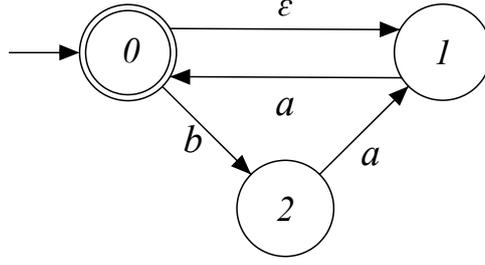


Figura 2.5: Autômato não determinístico do exemplo 2.7.

Para obter a linguagem gerada e marcada por  $G_{nd}$  é necessário estender o domínio de  $f_{nd}$  para  $X \times \Sigma^*$ . A função estendida é denotada por  $f_{nd}^{ext}$ . Para tanto, é necessário definir o alcance  $\varepsilon$ , denotado por  $\varepsilon R(x)$ .

**Definição 2.7 (Alcance  $\varepsilon$ )** *O alcance  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon R(x)$ , é o conjunto de todos os estados alcançados a partir de  $x$ , incluindo  $x$ , por transições rotuladas por  $\varepsilon$ . Por definição  $x \in \varepsilon R(x)$ . Para um conjunto de estados  $B \in X$ , tem-se que:*

$$\varepsilon R(B) = \bigcup_{x \in B} \varepsilon R(x).$$

Assim, pode-se definir a função estendida  $f_{nd}^{ext}$  como:

$$f_{nd}^{ext}(x, \varepsilon) = \varepsilon R(x).$$

Para  $s \in \Sigma^*$  e  $\sigma \in \Sigma$ , tem-se que:

$$f_{nd}^{ext}(x, s\sigma) = \varepsilon R[\{z : z \in f_{nd}(y, \sigma) \text{ para algum estado } y \in f_{nd}^{ext}(x, s)\}].$$

As linguagens geradas e marcadas por um autômato não determinístico são definidas a seguir.

**Definição 2.8 (linguagem gerada ( $L(G_{nd})$ ) e marcada  $L_m(G_{nd})$ )**

$$L(G_{nd}) = \{s \in \Sigma^* : (\exists x \in X_0)[f_{nd}^{ext}(x, s) \text{ é definida}]\}$$

$$L_m(G_{nd}) = \{s \in L(G_{nd}) : (\exists x \in X_0)[f_{nd}^{ext}(x, s) \cap X_m \neq \emptyset]\}$$

## 2.5 Autômato com Observação Parcial

Em sistemas reais nem sempre é possível detectar a ocorrência de todos os eventos devido às limitações dos sensores utilizados no sistema. Com o objetivo de representar esse fenômeno, o conjunto de eventos  $\Sigma$  pode ser particionado como  $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$ , em que  $\Sigma_o$  é o conjunto de eventos observáveis,  $\Sigma_{uo}$  é o conjunto de eventos não observáveis e  $\dot{\cup}$  representa a união de conjuntos disjuntos.

O comportamento esperado de um autômato  $G$  com observação parcial pode ser descrito por um autômato determinístico, denominado observador ou  $Obs(G)$ , cujo conjunto de eventos é formado pelos eventos observáveis  $\Sigma_o$ . Os estados do observador são todos os estados em que  $G$  pode estar após a observação de uma sequência de eventos observáveis.

Antes de apresentar o algoritmo para construção do observador, é necessário introduzir o conceito de alcance não observável de um estado  $x_i \in X$ , denotado por  $UR(x_i)$ .

**Definição 2.9 (Alcance não observável)** *O alcance não observável de um estado  $x_i$ ,  $UR(x_i)$ , é um conjunto formado pelos estados que são alcançados por eventos ou sequências não observáveis a partir do estado  $x_i$ .*

$$UR(x_i) = \{x_j \in X : (\exists t \in \Sigma_{uo}^*) [f(x_i, t) = x_j]\}.$$

Pode-se observar, pela definição 2.9, que  $x_i \in UR(x_i)$ . Esta definição pode ser estendida para um subconjunto de estados  $B \subseteq X$  da seguinte forma:

$$UR(B) = \bigcup_{x_i \in B} UR(x_i).$$

**Exemplo 2.8** *Seja  $G$  representado pelo diagrama de transição de estados, mostrado na figura 2.6, em que  $\Sigma_o = \{a, b\}$ ,  $\Sigma_{uo} = \{\sigma_u\}$ . A seta tracejada em  $G$  representa a transição constituída por um evento não observável. Note que o estado 1 é alcançado a partir do estado 0 por um evento não observável. Dessa forma, o alcance não observável do estado 0 é formado pelo próprio estado 0 e pelo estado 1, ou seja,  $UR(0) = \{0, 1\}$ .*

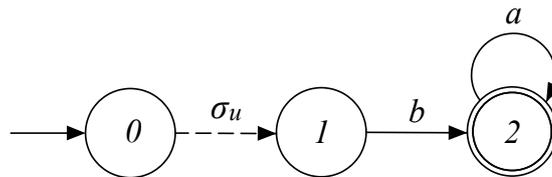


Figura 2.6: Autômato  $G$  com evento não observável do exemplo 2.8.

A definição do observador é apresentada a seguir.

**Definição 2.10 (Observador)** *O Observador de um autômato  $G$  em relação a um conjunto de eventos observáveis  $\Sigma_o$ , denotado por  $Obs(G)$ , é dado por:*

$$Obs(G) = (X_{obs}, \Sigma_o, f_{obs}, \Gamma_{obs}, x_{0,obs}, X_{m,obs}),$$

em que  $X_{obs} \subseteq 2^X$  e  $X_{m,obs} = \{B \in X_{obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$ . A função  $f_{obs}$  e o estado inicial  $x_{0,obs}$  são obtidos de acordo com o algoritmo 2.1.

---

**Algoritmo 2.1:** Construção do autômato observador [19]

---

**Entrada:**

- $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$ , em que  $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$

**Saída:**

- $G_{obs} = (X_{obs}, \Sigma_o, f_{obs}, \Gamma_{obs}, x_{0,obs}, X_{m,obs})$

```

1 início
2    $x_{0,obs} \leftarrow UR(x_0)$ 
3    $X_{obs} \leftarrow \{x_{0,obs}\}$ 
4   repita
5     para cada  $B \in X_{obs}$  faça
6       para cada  $\sigma \in \Sigma_o$  faça
7         se  $f(x_e, \sigma)$  é definido para  $x_e \in B$  então
8            $f_{obs}(B, \sigma) \leftarrow UR(\{x \in X : (\exists x_e \in B)[x = f(x_e, \sigma)]\})$ 
9            $X_{obs} \leftarrow X_{obs} \cup UR(\{x \in X : (\exists x_e \in B)[x = f(x_e, \sigma)]\})$ 
10          fim
11         senão
12            $f_{obs}(B, \sigma) \leftarrow indefinido$ 
13        fim
14      fim
15    fim
16  até que toda a parte acessível de  $Obs(G)$  tenha sido construída;
17   $X_{m,obs} \leftarrow \{B \in X_{obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$ 
18  retorna  $G_{obs}$ 
19 fim

```

---

A partir da construção do  $Obs(G)$ , tem-se as seguintes propriedades:

1.  $Obs(G)$  é um autômato determinístico;
2.  $L(Obs(G)) = P_o[L(G)]$ , sendo  $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ ;
3.  $L_m(Obs(G)) = P_o[L_m(G)]$ ;
4. Seja  $B(t) \subseteq X$  o estado do  $Obs(G)$  alcançado após a sequência  $t \in P_o[L(G)]$ , isto é,  $B(t) = f_{obs}(x_{0,obs}, t)$ . Então  $x \in B(t)$  se e somente se  $x$  for alcançável

em  $G$ , isto é existe uma sequência:

$$s \in P_o^{-1}(G) \cup L(G) : f(x_0, s) = x.$$

Logo,  $B(t)$  é a melhor estimativa dos possíveis estados onde  $G$  pode estar após a observação da sequência de eventos  $t$ .

**Exemplo 2.9** Seja  $G$  o autômato representado na figura 2.7, em que  $\Sigma = \{a, b, c, \sigma_u\}$ ,  $\Sigma_o = \{a, b, c\}$  e  $\Sigma_{uo} = \{\sigma_u\}$ . O observador de  $G$  é apresentado na figura 2.8. Note que antes da ocorrência de um evento observável, não é possível precisar se o sistema encontra-se no estado inicial 0 ou no estado 1, uma vez que a ocorrência do evento  $\sigma_u$  não pode ser registrada. Assim, o estado inicial do observador é  $\{0, 1\}$ . Caso o próximo evento observável seja o evento  $a$ , pode-se afirmar que o autômato estará no estado 4. Se ao invés de ocorrer o evento  $a$ , ocorrer o evento  $c$ , pode-se afirmar que o autômato estará ou no estado 2, ou no 3, cuja representação é dada por  $\{2, 3\}$ . Se ocorrer novamente o evento observável  $c$ , o próximo estado do observador será o mesmo, isto é, o estado  $\{2, 3\}$ . Dessa forma, não é possível identificar de forma única em qual estado o autômato se encontra após a observação da sequência  $s = cc$ .

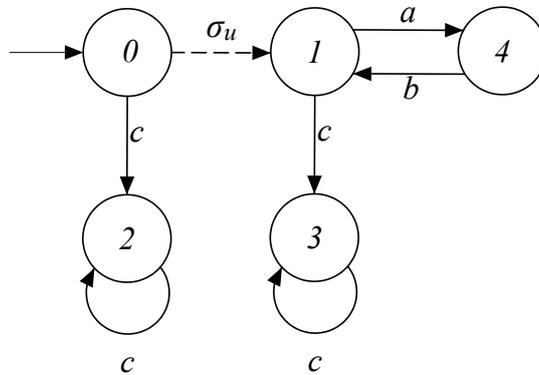


Figura 2.7: Autômato  $G$  do exemplo 2.9.

## 2.6 Representação de Autômatos com Entradas e Saídas

Existem duas variações para a definição de autômatos que são úteis na modelagem de sistemas com entradas e saídas: os autômatos de *Moore* e de *Mealy*[20].

Os autômatos de *Moore* são autômatos com saídas em seus estados. As saídas associadas a cada estado podem ser escritas na forma estado/saída, como ilustrado

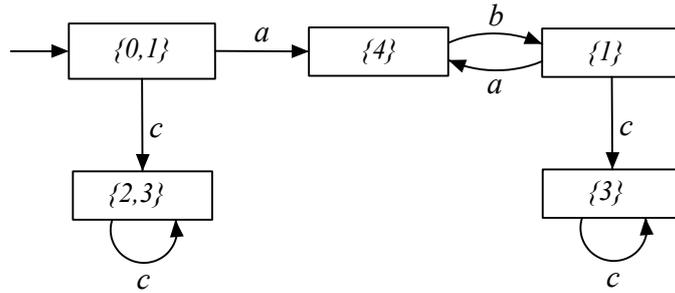


Figura 2.8: Autômato  $Obs(G)$  do exemplo 2.9.

na figura 2.9 (a), em que a saída do estado  $x$  é  $s_x$ , e a saída do estado  $y$  é  $s_y$ . A interpretação do autômato de Moore é que a saída associada a um determinado estado é emitida pelo autômato quando esse estado é alcançado.

Os autômatos de *Mealy*, por sua vez, possuem em suas transições eventos da forma entrada/saída. A interpretação da transição  $e_i/s_y$  (figura 2.9 (b)) é que a partir do estado  $x$  o autômato recebe como entrada o evento  $e_i$ , em seguida ele fará a transição para o estado  $y$  e nesse processo, instantaneamente, acontecerá o evento de saída  $s_y$ .

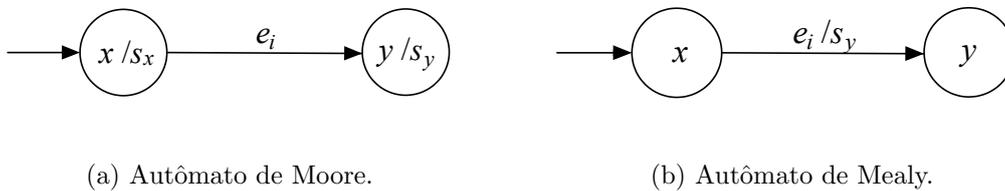


Figura 2.9: Autômatos com entradas e saídas.

O conhecimento sobre a representação dos autômatos com entradas e saídas é importante para a construção de modelos de sistemas a eventos discretos. Os sistemas eletromecânicos, em geral, são aplicações que possuem sensores que fornecem informações sobre o estado físico do sistema, como, por exemplo, sistema de manufatura, controle de processos, unidades de aquecimento. Esses sistemas são compostos por componentes ativos, representados pelas bombas, válvulas, máquinas, controladores e etc, e também por componentes passivos, representados por sensores, como os pressostatos, fluxostatos, termômetros e etc. Na modelagem modular desses sistemas, os componentes ativos podem ser modelados por autômatos e o comportamento integrado desses componentes é obtido através da operação de composição paralela, resultando no autômato  $\tilde{G}$ , ilustrado na figura 2.10. A planilha de sensores é uma tabela que contém as informações de leitura dos  $M$  sensores do sistema para cada estado do autômato  $\tilde{G}$ . As transformações de  $\tilde{G}$  em autômatos de *Mealy* ou de *Moore*, recebem como entrada  $\tilde{G}$  e a planilha de

sensores para obter  $G_{Mealy}$  e  $G_{Moore}$ , respectivamente, como pode ser observado na figura 2.10. Esses autômatos resultantes possuem o comportamento integrado dos componentes passivos e ativos do sistema. No exemplo 2.10 é considerado um sistema no qual é realizada a modelagem modular de seus componentes ativos e são feitas transformações para os autômatos de Moore e de Mealy para inserir o comportamento dos sensores envolvidos no sistema modelado.

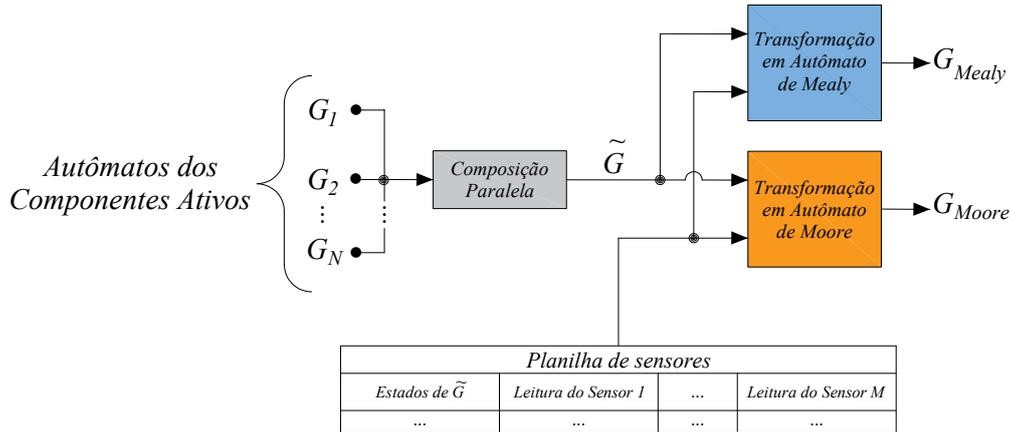


Figura 2.10: Modelagem e transformação em autômato de Moore e de Mealy.

**Exemplo 2.10** Considere que em um sistema de aquecimento existe uma bomba, uma válvula, um sensor de pressão e um sensor de vazão, dispostos conforme a figura 2.11. A bomba possui dois estados de funcionamento, Bomba desligada (BOFF) e Bomba ligada (BON). A válvula também possui dois estados, Válvula fechada (VF) e Válvula aberta (VA). Já o controlador é responsável por coordenar a sequência de comandos para a bomba e a válvula. Na figura 2.12 estão modelados os autômatos individuais da bomba, da válvula e do controlador. A descrição dos estados e eventos da bomba, da válvula e do controlador estão descritos nas tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente.

O sensor de pressão fornece sinal de saída discreta com a informação sobre o estado de pressurização da rede. Quando a bomba está ligada a saída do sensor de pressão é  $P$ , caso contrário é  $SP$ . Já o sensor de vazão indica se há ou não fluxo na rede. Quando a bomba está ligada e a válvula está aberta, o sensor de vazão tem como saída o sinal  $V$ , caso contrário sua saída é  $SV$ .

O comportamento integrado dos componentes ativos do sistema é modelado pelo autômato  $\tilde{G}_{aq} = G_{Bomba} || G_{Válvula} || G_{Controlador}$ , ilustrado na figura 2.13 (a), em que  $\tilde{G}_{aq} = (\tilde{X}_{aq}, \tilde{\Sigma}_{aq}, \tilde{f}_{aq}, \tilde{\Gamma}_{aq}, \tilde{x}_{0,aq}, \tilde{X}_{m,aq})$ . Note que o autômato  $\tilde{G}_{aq}$  não possui informações sobre o comportamento dos sensores de pressão e de vazão. Para transformá-lo em um autômato de entradas e saídas, inicialmente deve-se construir a

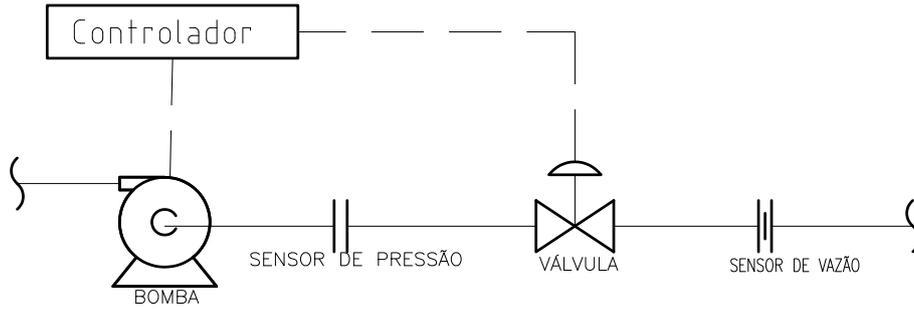


Figura 2.11: Arranjo dos componentes do exemplo 2.10.

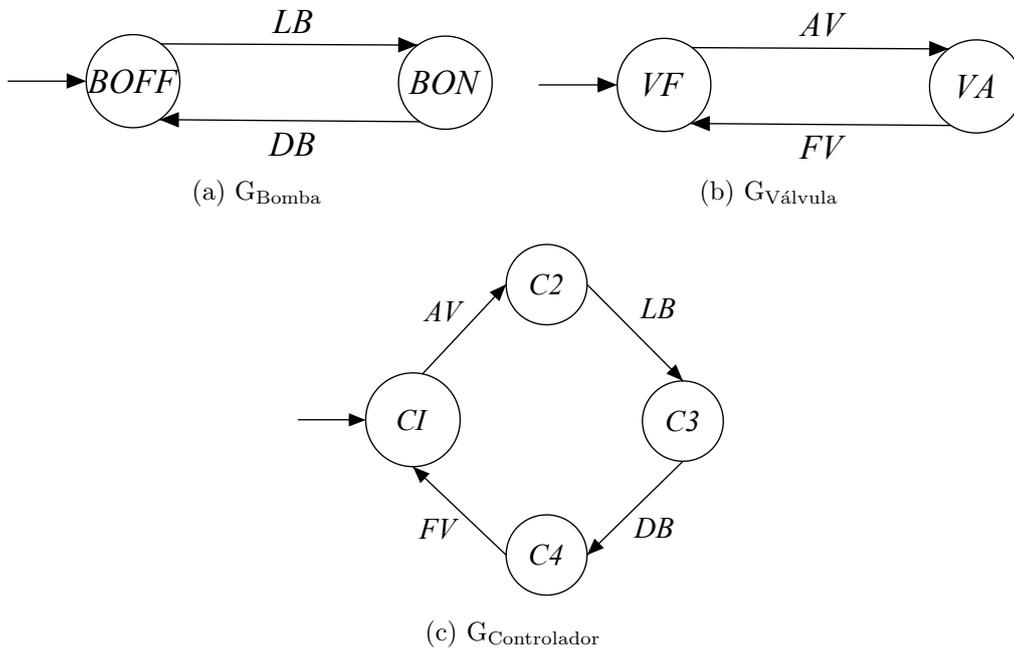


Figura 2.12: Autômatos que modelam os componentes ativos do exemplo 2.10.

tabela 2.4 que relaciona os estados do autômato  $\tilde{G}_{aq}$  com as saídas dos sensores do sistema. Para obter o autômato de Moore, é realizada a renomeação dos estados de  $\tilde{G}_{aq}$ , inserindo as respectivas informações dos sensores para cada estado, conforme tabela 2.4, resultando no autômato  $G_{aqMoore}$ , ilustrado na figura 2.13 (b). Já na transformação para o autômato de Mealy, renomeia-se cada evento de  $\tilde{G}_{aq}$  com as informações de saída dos sensores do estado de destino, o resultado está ilustrado na figura 2.13 (c).

Tabela 2.1: Estados e eventos do autômato da bomba ( $G_{\text{Bomba}}$ ) do exemplo 2.10.

Estado	Descrição	Evento	Descrição
$BOFF$	Bomba desligada	$LB$	Comando para ligar a bomba
$BON$	Bomba ligada	$DB$	Comando para desligar a bomba

Tabela 2.2: Estados e eventos do autômato da válvula ( $G_{\text{Válvula}}$ ) do exemplo 2.10.

Estado	Descrição	Evento	Descrição
$VF$	Válvula fechada	$AV$	Comando para abrir a válvula
$VA$	Válvula aberta	$FV$	Comando para fechar a válvula

Tabela 2.3: Estados do autômato do controlador ( $G_{\text{Controlador}}$ ) do exemplo 2.10.

Estado	Descrição	Estado	Descrição
$C1$	Estado inicial do controlador	$C3$	Terceiro estado do controlador
$C2$	Segundo estado do controlador	$C4$	Quarto estado do controlador

Tabela 2.4: Comportamento dos sensores para o autômato  $\tilde{G}_{aq}$  do exemplo 2.10.

Estado	Saída do Sensor de Pressão	Saída do Sensor de Vazão
$(BOFF, VF, C1)$	SP	SV
$(BOFF, VA, C2)$	SP	SV
$(BON, VA, C3)$	P	V
$(BOFF, VA, C4)$	SP	SV

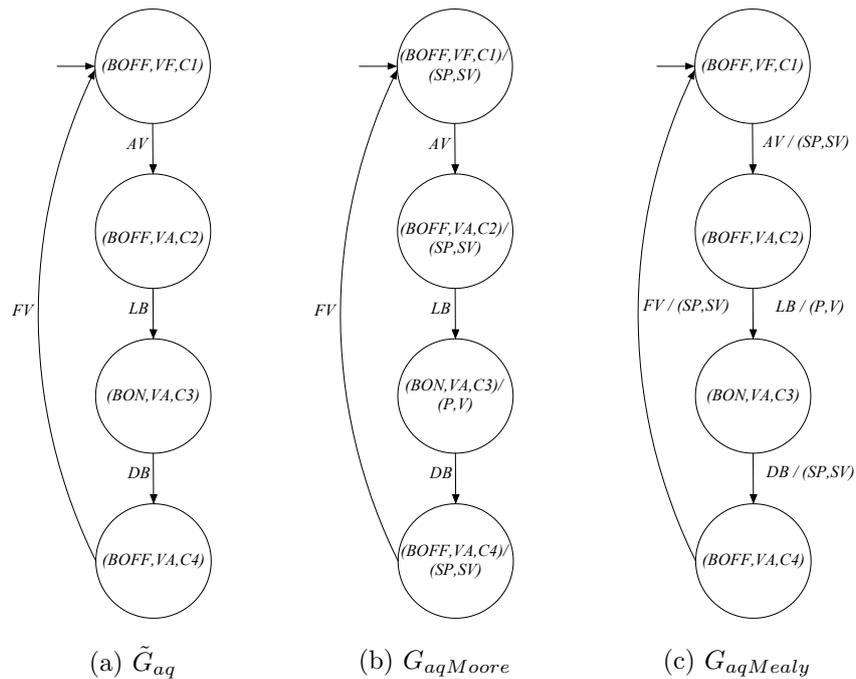


Figura 2.13: Autômatos  $\tilde{G}$ ,  $Moore$  e  $Mealy$  do exemplo 2.10.

Como foi mostrado no exemplo 2.10, tanto o autômato de *Moore* como o autômato de *Mealy* representam completamente o sistema que foi modelado, com as informações dos sensores integradas ao comportamento conjunto dos componentes ativos do sistema. Em [6], o autômato de *Mealy* é tratado como o autômato padrão com entradas e saídas em que o conjunto de eventos  $\Sigma$  é formado por todos os eventos rotulados no formato entrada/saída, e a linguagem gerada é o conjunto de todas as sequências da forma entrada/saída que podem ser geradas pelo autômato. Para um autômato de *Moore* ser tratado como um autômato padrão, primeiro é necessário transformá-lo em um autômato de *Mealy*, essa conversão é feita ao associar as saídas de um estado a todos os eventos que entram nesse estado, como pode ser observado na figura 2.13.

É importante destacar que no exemplo 2.10 todos os eventos são observáveis, o que tornou possível, a partir do autômato  $\tilde{G}_{aq}$ , realizar as transformações para os autômatos de *Moore* e de *Mealy*. Caso algum evento não observável pertencesse ao conjunto do eventos  $\tilde{\Sigma}_{aq}$ , essas transformações não seriam adequadas e seria necessário utilizar o chamado Mapeamento de Sensores [11], que será descrito na seção 2.8..

## 2.7 Diagnose de Falhas de Sistemas a Eventos Discretos

Em muitas aplicações pode-se estar interessado em determinar se alguns eventos não-observáveis pertencem à sequência observável que foi executada pelo sistema. Se os eventos não-observáveis modelam falhas de componentes, o conhecimento sobre a sua ocorrência é muito importante para assegurar um desempenho seguro. A seguir serão apresentados os fundamentos da diagnose falhas conforme [8, 19].

Seja  $\Sigma_f$  o conjunto de eventos de falha. Supõe-se, sem perda de generalidade, que  $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$ , uma vez que se o evento de falha fosse observável, a sua ocorrência seria trivialmente diagnosticada. O objetivo do diagnóstico de falhas em SED é detectar a ocorrência de qualquer evento de falha, analisando somente as sequências de eventos observáveis geradas pelo sistema.

**Definição 2.11 (Sequência Normal e de Falha)** *Uma sequência de falha é uma sequência de eventos que contém o evento de falha  $\sigma_f$ . Caso contrário, a sequência é dita ser normal.*

**Definição 2.12 (Linguagem Normal e de Falha)** *Seja  $L$  a linguagem viva<sup>1</sup> e prefixo fechada gerada<sup>2</sup> por  $G$ . Então, a linguagem normal de  $G$ ,  $L_N$ , é uma lingua-*

<sup>1</sup> $\Gamma(x_i) \neq \emptyset$  para todo  $x_i \in X$ .

<sup>2</sup> $L(G) = \overline{L(G)}$ .

gem prefixo fechada formada por todas as sequências de  $L$  que não contêm o evento de falha  $\sigma_f$ .

### 2.7.1 Diagnosticabilidade de Falhas em SED

Uma linguagem  $L$  é dita ser diagnosticável se é possível detectar a ocorrência do evento de falha após um número limitado de observações de eventos após a ocorrência da falha. A definição formal da diagnosticabilidade de uma linguagem é dada a seguir.

**Definição 2.13 (Diagnosticabilidade [8])** *Seja  $L$  uma linguagem viva e prefixo fechada gerada por um autômato  $G$  e seja  $L_N \subset L$  a linguagem normal de  $G$ . Então  $L$  é dita ser diagnosticável com relação à projeção  $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$  e ao conjunto de eventos de falha  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  se:*

$$(\exists n \in \mathbb{N})(\forall s \in L \setminus L_N)(\forall st \in L \setminus L_N)(|t| \geq n \implies D),$$

sendo a condição  $D$  dada por:

$$(\forall w \in P_o^{-1}(P_o(st)) \cap L, w \in L \setminus L_N).$$

Seja  $s$  uma sequência qualquer gerada pelo sistema que termina com um evento de falha  $\sigma_f$ , e seja  $t$  uma sequência arbitrariamente longa após  $s$ . Então, a condição  $D$  requer que todas as sequências, cujas projeções em  $\Sigma_o^*$  são iguais à projeção de  $s$ , sejam sequências de falha, isto é, não exista nenhuma sequência de falha que tenha a mesma observação que uma sequência normal.

### 2.7.2 Diagnosticador $G_{scc}$

O diagnosticador  $G_{scc}$  é utilizado para verificar a diagnosticabilidade de uma linguagem  $L$  gerada por um autômato  $G$  [21]. O diagnosticador, assim como o observador, fornece uma estimativa dos estados do sistema, contudo, diferentemente do observador, os estados de  $G_{scc}$  são rotulados para informar se o estado foi alcançado após um evento de falha. Nesta dissertação, o  $G_{scc}$  será denotado por  $G_{scc} = (X_{scc}, \Sigma_{scc}, f_{scc}, \Gamma_{scc}, x_{0,scc}, X_{m,scc})$ . O algoritmo 2.2 descreve os passos para a construção do diagnosticador  $G_{scc}$  que possui como entradas o autômato  $G$  e o autômato rotulador  $A_l$ , ilustrado na figura 2.14. Após o início do algoritmo, no passo 2, é calculado o autômato rotulado  $G_l = G || A_l$ , no passo seguinte, obtém-se o autômato  $G_d = Obs(G_l)$ , e por fim, encontra-se o diagnosticador  $G_{scc} = G_d || G_l$  no passo 4.

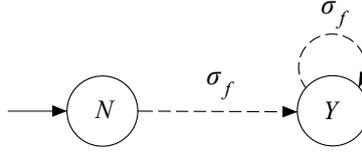


Figura 2.14: Autômatos rotulador  $A_l$ .

---

**Algoritmo 2.2:** Cálculo do autômatos diagnosticador  $G_{scc}$

---

**Entrada:**

- $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  em que  $\Sigma = \{\Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}\}$
- $A_l = (X_l, \Sigma_l, f_l, \Gamma_l, x_{0,l}, X_{m,l})$

**Saída:**

- $G_{scc} = (X_{scc}, \Sigma_{scc}, f_{scc}, \Gamma_{scc}, x_{0,scc}, X_{m,scc})$

1 **início**

2      $G_l \leftarrow G || A_l$

3      $G_d \leftarrow Obs(G_l)$

4      $G_{scc} \leftarrow G_d || G_l$

5     **retorna**  $G_{scc}$

6 **fim**

---

Observe que os estados de  $G_l$  são da forma  $(x, N)$  e  $(x, Y)$ , sendo os estados que são alcançados por uma sequência que contenha o evento de falha da forma  $(x, Y)$  e, caso contrário, da forma  $(x, N)$ . Note ainda que um estado de  $G_d$ , é formado por um conjunto de estados de  $G_l$  fornecendo a estimativa do estado do sistema após a observação de uma sequência de eventos. O autômatos  $G_d$  também pode ser utilizado para verificação da diagnosticabilidade de uma linguagem conforme descrito em [6, 8]. Nesta dissertação,  $G_d$  será empregado com a finalidade de realizar a diagnose *online* de falhas a partir do acompanhamento do comportamento observável do sistema. Os estados de  $G_d$  podem ser classificados, quanto à presença de rótulos  $Y$  e  $N$ , da seguinte forma.

**Definição 2.14 (Estado de falha, Estado normal e Estado incerto)** *Um estado  $x_d \in X_d$  é dito ser um estado de falha (certo), se  $l = Y$  para todo  $(x, l) \in x_d$ , e um estado normal (ou sem falha) se  $l = N$  para todo  $(x, l) \in x_d$ . Se existir  $(x_i, l_i), (x_j, l_j) \in x_d$ ,  $x_i$  não necessariamente distinto de  $x_j$ , tal que  $l_i = Y$  e  $l_j = N$ , então  $x_d$  é um estado incerto de  $G_d$ .*

Para verificar a diagnosticabilidade de uma linguagem utilizando o autômatos  $G_{scc}$ , uma busca por componentes fortemente conexas deve ser realizada nesse autômatos. A definição de componente fortemente conexa é dada a seguir.

**Definição 2.15 (Componentes fortemente conexas)** *Um subconjunto  $U$  de estados de um autômatos é uma componente fortemente conexa (CFC) se as seguintes condições são satisfeitas:*

1. Para todo par de estados  $x, y \in U$ , existe um caminho de  $x$  para  $y$  e um caminho de  $y$  para  $x$ .
2. O conjunto  $U$  é máximo em relação ao item 1 acima, ou seja,  $\forall z \in U, U \cup \{z\}$  não é uma componente fortemente conexa.

**Definição 2.16 (Componente fortemente conexa não trivial)** *Seja  $U$  tal que  $|U| > 0$ . Então  $x \in U$  é uma CFC não trivial se existe um evento  $\sigma \in \Gamma(x)$  tal que  $f(x, \sigma) = x$ .*

A diagnosticabilidade do autômato  $G_{scc}$  é enunciada pelo teorema a seguir.

**Teorema 2.1** *A linguagem  $L$ , gerada por um autômato  $G$ , será diagnosticável com relação à projeção  $P_o$  e  $\Sigma_f = \sigma_f$  se, e somente se, não existirem componentes fortemente conexos não triviais formados por seus estados  $(x_d, x_l)$ , tais que  $x_d$  seja incerto e  $x_l$  seja de falha.*

A construção do diagnosticador  $G_{scc}$  e a verificação da diagnosticabilidade serão ilustradas nos exemplos a seguir.

**Exemplo 2.11** *Considere o autômato  $G$ , em que  $\Sigma_o = \{a, b, c\}$  e  $\Sigma_{uo} = \{\sigma_u, \sigma_f\}$ , cujo diagrama de transição de estados está representado na figura 2.15.*

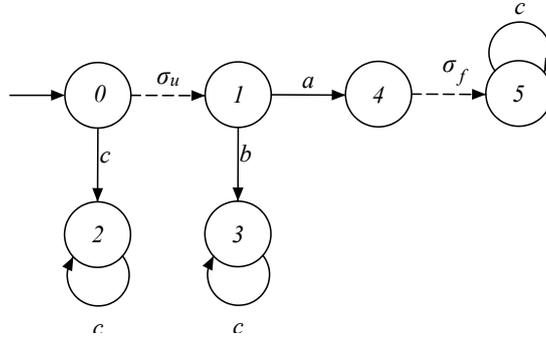


Figura 2.15: Autômato  $G$  do exemplo 2.11.

Seguindo o passo 2 do algoritmo 2.2, obtém-se o autômato  $G_l$ , apresentado na figura 2.16.

Em seguida, calculando  $G_d = \text{Obs}(G_l)$ , obtém-se o autômato apresentado na figura 2.17. Por fim, calcula-se o diagnosticador  $G_{scc} = G_d || G_l$ , ilustrado na figura 2.18.

Observe que existem três componentes fortemente conexos não triviais em  $G_{scc}$ . A primeira componente fortemente conexa é formada pelo estado  $(\{2N\}, \{2N\})$ , a segunda pelo estado  $(\{3N\}, \{3N\})$  e a terceira pelo estado  $(\{5Y\}, \{5Y\})$ . Note que nenhuma das componentes fortemente conexas não triviais de  $G_{scc}$  é formada por estados  $(x_d, x_l)$  em que  $x_d$  é incerto e  $x_l$  é de falha. Portanto, a linguagem  $L$  é

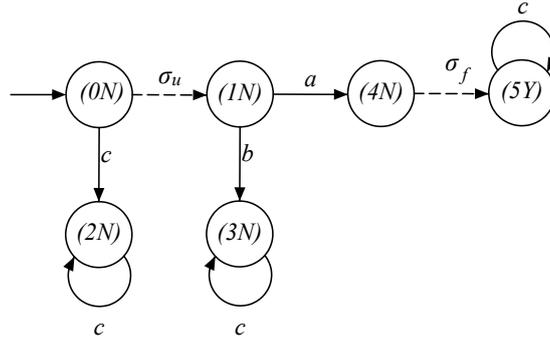


Figura 2.16: Autômato  $G_l$  do exemplo 2.11.

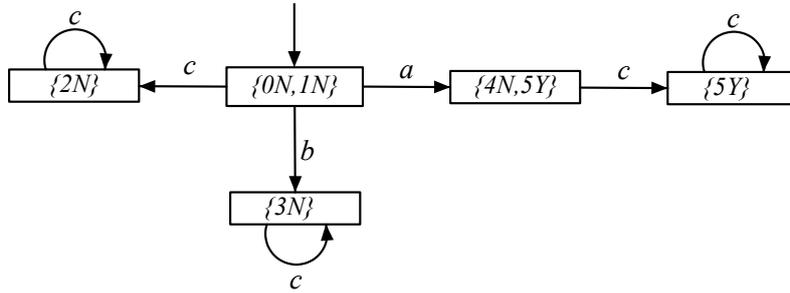


Figura 2.17: Diagnosticador  $G_d$  do exemplo 2.11.

diagnosticável com relação a  $P_o$  e  $\Sigma_f$ . Após a verificação da diagnosticabilidade, o autômato  $G_d$ , representado na figura 2.17, pode ser utilizado na diagnose online. Por exemplo, se o evento  $a$  ocorrer, o diagnosticador online  $G_d$  evoluirá para o estado incerto  $\{4N, 5Y\}$ , e o  $G_d$  estará em dúvida quanto à ocorrência da falha. Em seguida, se o evento  $c$  ocorrer, então o diagnosticador  $G_d$  alcançará o estado certo  $\{5Y\}$ , indicando que a falha ocorreu.

**Exemplo 2.12** Considere agora o autômato  $G$  apresentado na figura 2.19, em que  $\Sigma_o = \{a, b, c\}$  e  $\Sigma_{uo} = \{\sigma_u, \sigma_f\}$ . O diagnosticador teste  $G_{scc}$  é apresentado na figura 2.20.

Note que existe uma componente fortemente conexa não trivial em  $G_{scc}$  formada pelo estado  $(\{2N, 5Y\}, \{5Y\})$ , em que o componente  $x_d = \{2N, 5Y\}$  é do tipo incerto

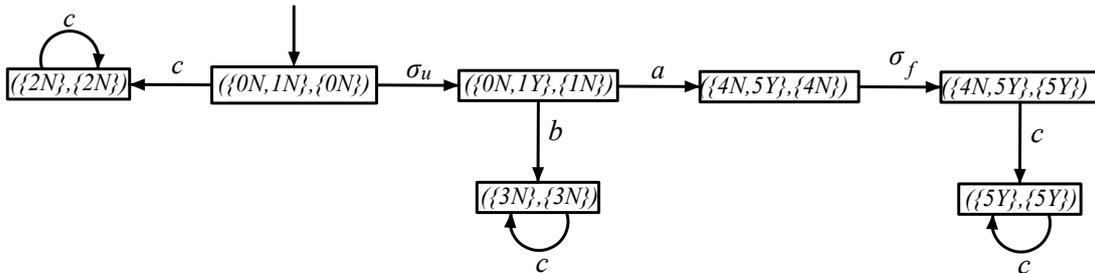


Figura 2.18: Autômato  $G_{scc}$  do exemplo 2.11.

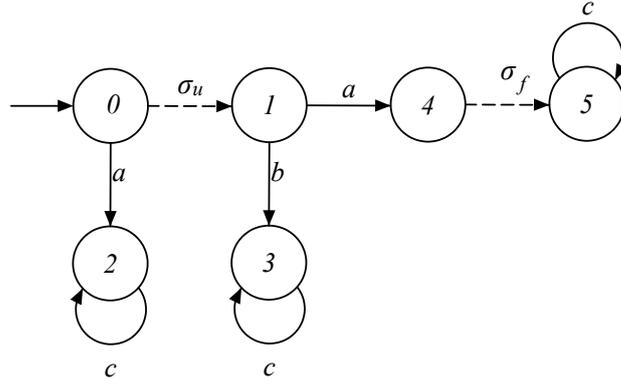


Figura 2.19: Autômato  $G$  do exemplo 2.12.

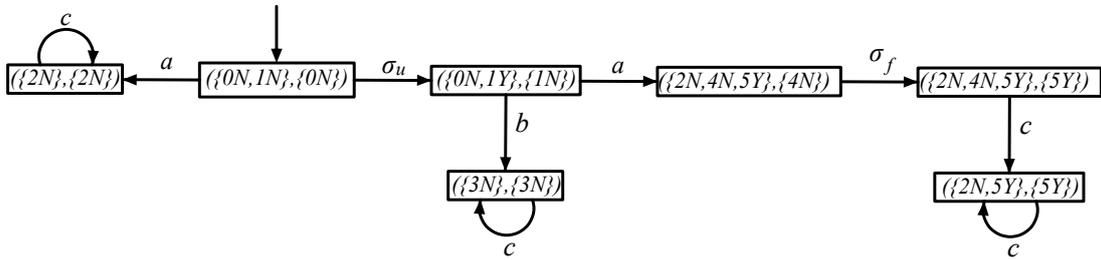


Figura 2.20: Autômato  $G_{scc}$  do exemplo 2.12.

e o componente  $x_l = \{5Y\}$  é de falha. Então, a linguagem  $L$ , gerada por  $G$ , não será diagnosticável em relação a projeção  $P_o$  e a  $\Sigma_f$ .

Como visto anteriormente, a construção de diagnosticadores requer, em primeiro lugar, a obtenção de um autômato  $G$  que modela um SED e que capture tanto o comportamento normal quanto o comportamento do sistema levando-se em consideração a ocorrência da falha. Sabendo que quanto maior o volume de informação sobre o comportamento do sistema (medições, variáveis, tempos de ocorrência e etc), maior será a número de falhas que poderão ser detectadas. Como as informações sobre a evolução dinâmica do sistema é capturada por meio dos sensores instalados no processo, então é muito importante utilizar um método capaz de integrar as informações dos sensores ao sistema modelado. Um desses métodos é o chamado Mapeamento de Sensores, que pode ser utilizado para adicionar informações fornecidas pelos sensores ao sistema modelado, aumentando assim, a capacidade de diagnóstico. O Mapeamento de Sensores será apresentado na seção seguir.

## 2.8 Mapeamento de Sensores

O Mapeamento de Sensores (MS) [11] é um procedimento sistemático que combina as informações provenientes dos sensores do processo com as informações de seus componentes ativos, resultando em um autômato que modela o comportamento completo do sistema. O MS modifica o procedimento de transformação em autômato de *Mealy*, que foi apresentado na seção 2.6, para considerar o caso em que o sistema possui eventos não observáveis.

Na figura 2.21 está ilustrada a arquitetura da modelagem modular de um SED utilizando o MS. Essa modelagem parte da construção dos  $N$  autômatos que modelam os componentes ativos, denominados de  $G_i, i = 1, \dots, N$ , em que  $N$  é o número total de componentes ativos. A composição paralela entre esses autômatos resulta no autômato  $\tilde{G} = (\tilde{X}, \tilde{\Sigma}, \tilde{f}, \tilde{\Gamma}, \tilde{x}_0, \tilde{X}_m)$ , em que  $\tilde{\Sigma} = \bigcup_i \Sigma_i$ . O Mapa de Sensores (MDS) é uma função do tipo  $h_j : \tilde{X} \rightarrow Y_j, j = 1, \dots, M$ , em que  $M$  representa o número total de sensores de interesse do sistema,  $Y_j$  denota o conjunto discreto das saídas possíveis do  $j$ -ésimo sensor e  $Y$  é definido como:

$$Y = \prod_{j=1}^M Y_j. \quad (2.1)$$

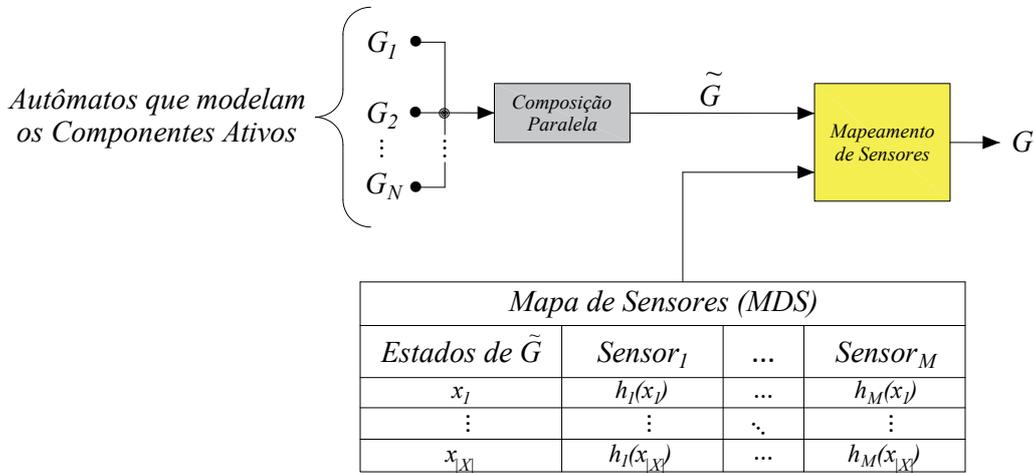


Figura 2.21: Arquitetura da modelagem de SED utilizando o MS.

Dessa forma, o MDS de um estado  $x$  é denotado por:

$$h(x) = (h_1(x), h_2(x), \dots, h_M(x)), \quad (2.2)$$

e pode também ser escrito em formato de tabela, conforme figura 2.21, na qual  $h_j(x_i)$  representa a saída do  $j$ -ésimo sensor para o estado  $x_i$ .

O procedimento do MS é descrito no algoritmo 2.3. As entradas são o autômato  $\tilde{G}$  e o MDS, e a saída é o autômato  $G$ . O algoritmo 2.3 busca alterar cada transição  $x \xrightarrow{\sigma} y \in \tilde{G}$  de acordo com as seguintes regras [11]:

1. Se o evento  $\sigma$  for observável (tipicamente um evento de comando), ele deve ser renomeado por  $\langle \sigma, h(y) \rangle$ , resultando na transição  $x \xrightarrow{\langle \sigma, h(y) \rangle} y$ . O novo evento  $\langle \sigma, h(y) \rangle$  é observável em  $\tilde{\Sigma}$  (passos 4 a 6).
2. Se  $\sigma$  não for observável e se  $h(x) \neq h(y)$ , então adicione um novo estado  $\langle x, \sigma, y \rangle$  ao conjunto  $\tilde{X}$  (passo 9) e substitua a transição  $x \xrightarrow{\sigma} y$  por:
  - (a)  $x \xrightarrow{\sigma} \langle x, \sigma, y \rangle$  (passo 11); e
  - (b)  $\langle x, \sigma, y \rangle \xrightarrow{\langle h(x) \rightarrow h(y) \rangle} y$  (passo 12).

Nenhuma alteração é realizada na transição  $x \xrightarrow{\sigma} y$  se  $\sigma \in \tilde{\Sigma}_{uo}$  e  $h(x) = h(y)$ . Ao final do algoritmo, as informações dos  $M$  sensores estarão integradas aos eventos dos componentes ativos do sistema, resultando no autômato  $G$ .

---

**Algoritmo 2.3:** Mapeamento de Sensores

---

**Entrada:**

- $\tilde{G} = (\tilde{X}, \tilde{\Sigma}, \tilde{f}, \tilde{\Gamma}, \tilde{x}_0, \tilde{X}_m)$ , em que  $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}_o \cup \tilde{\Sigma}_{uo}$
- MDS: mapa com informações dos sensores

**Saída:**

- $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$

```

1 início
2    $G \leftarrow \tilde{G}$ 
3   para cada transição  $x \xrightarrow{\sigma} y \in \tilde{G}$  faça
4     se  $\sigma \in \tilde{\Sigma}_o$  então
5        $\sigma \leftarrow \langle \sigma, h(y) \rangle$ 
6     fim
7     se  $\sigma \notin \tilde{\Sigma}_o$  e  $h(x) \neq h(y)$  então
8        $x_{new} \leftarrow \langle x, \sigma, y \rangle$ 
9        $\tilde{X} \leftarrow \tilde{X} \cup x_{new}$ 
10       $f(x, \sigma) \leftarrow \text{indefinido}$ 
11       $f(x, \sigma) \leftarrow x_{new}$ 
12       $f(x_{new}, \langle h(x) \rightarrow h(y) \rangle) \leftarrow y$ 
13    fim
14  fim
15  retorna  $G$ 
16 fim
```

---

A seguir, o MS é aplicado ao sistema de aquecimento que foi modelado no exemplo 2.10. Porém, dessa vez, o autômato da válvula possui um novo estado  $VTF$  e um novo evento de falha  $tf$ .

**Exemplo 2.13** Retomemos o sistema de aquecimento considerado no exemplo 2.10, porém, agora supondo que a válvula possui um novo estado de falha: travada fechada (VTF). O autômato  $G_{Vf}$  da figura 2.22 modela esse comportamento. Note que o evento de falha ‘travada fechada’,  $tf$ , é não observável.

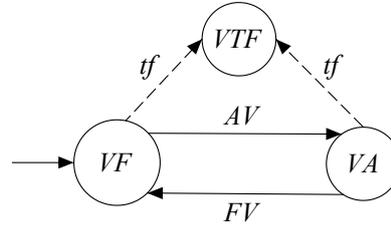


Figura 2.22: Autômato  $G_{Vf}$ .

O resultado da composição síncrona entre  $G_{Bomba}$ ,  $G_{Controlador}$ , da figura 2.12, e  $G_{Vf}$  da figura 2.22 é o autômato  $\tilde{G}_{aqf}$ , que possui 8 estados alcançáveis, ilustrado na figura 2.23. Note que o conjunto de eventos observáveis de  $\tilde{G}_{aqf}$  é  $\tilde{\Sigma}_{o,aqf} = \{AV, LB, DB, FV\}$ . Na tabela 2.5 estão descritos os estados do autômato  $\tilde{G}_{aqf}$ . Para o preenchimento do Mapa de Sensores é importante conhecer o conjunto das saídas possíveis  $Y_j$  de cada sensor  $j$ . Definindo como  $j = 1$  o sensor de pressão e como  $j = 2$  o sensor de vazão, tem-se que  $Y_1 = \{P, SP\}$  e  $Y_2 = \{V, SV\}$ . Em seguida, é preenchida a saída de cada sensor de acordo com os estados de  $\tilde{G}_{aqf}$ . Por exemplo, para o estado 1,  $h_1(\{BOFF, C1, VF\}) = SP$  e  $h_2(\{BOFF, C1, VF\}) = SV$ , para o estado 2,  $h_1(\{BOFF, C1, VTF\}) = SP$  e  $h_2(\{BOFF, C1, VTF\}) = SV$ . O Mapa de Sensores completo para o autômato  $\tilde{G}_{aqf}$ , está descrito na tabela 2.5.

Tabela 2.5: MDS para o autômato  $\tilde{G}_{aqf}$ .

Número do Estado	Nome do Estado	Sensor de Pressão	Sensor de Vazão
1	(BOFF,C1,VF)	SP	SV
2	(BOFF,C1,VTF)	SP	SV
3	(BOFF,C2,VA)	SP	SV
4	(BOFF,C2,VTF)	SP	SV
5	(BON,C3,VA)	P	V
6	(BON,C3,VTF)	P	SV
7	(BOFF,C4,VA)	SP	SV
8	(BOFF,C4,VTF)	SP	SV

Aplicando-se o algoritmo 2.3 ao autômato  $\tilde{G}_{aqf}$  e ao MDS da tabela 2.5, obtém-se o autômato  $G_{aqf}$  mostrado na figura 2.24, que incorpora as informações dos sensores de pressão e de vazão ao  $\tilde{G}_{aqf}$ . O algoritmo 2.3 irá percorrer todas transições de  $\tilde{G}_{aqf}$  que possuem eventos observáveis e renomeá-los. Por exemplo, o evento

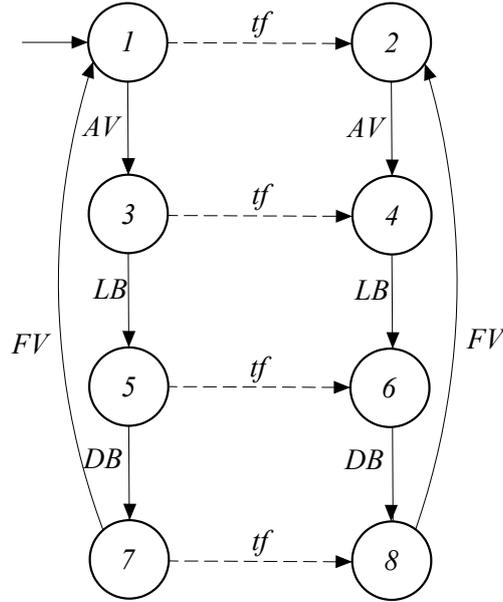


Figura 2.23: Autômato  $\tilde{G}_{aqf} = G_{Bomba} || G_{Controlador} || G_{Vf}$ .

observável  $AV$  da transição  $1 \xrightarrow{AV} 3$  será renomeado por  $(AV, SP, SV)$  resultando na transição  $1 \xrightarrow{(AV, SP, SV)} 3$  pois  $h(3) = h(BOFF, C2, VA) = (SP, SV)$ . Já para as transições que possuem eventos não observáveis e que  $h(\text{estado de origem}) \neq h(\text{estado de destino})$ , como é o caso da transição  $5 \xrightarrow{tf} 6$ , em que  $h(5) = (P, V)$  e  $h(6) = (P, SV)$ , será criado um novo estado  $\langle 5, tf, 6 \rangle$  e duas novas transições  $5 \xrightarrow{tf} \langle 5, tf, 6 \rangle$  e  $\langle 5, tf, 6 \rangle \xrightarrow{(P, V) \rightarrow (P, SV)} 6$  que substituirão a transição  $5 \xrightarrow{tf} 6$ , como representado nos passos 7 a 13 do algoritmo 2.3. As outras transições que possuem eventos não observáveis e para as quais  $h(\text{estado de origem}) = h(\text{estado de destino})$  não são alteradas. O resultado do algoritmo aplicado neste caso é o autômato  $G_{aqf}$ , ilustrado na figura 2.24.

O autômato diagnosticador  $G_{d,aqf} = Obs(G_{aqf} || A_l)$  está representado na figura 2.25. Para verificar a diagnosticabilidade, constrói-se  $G_{scc,aqf} = (G_{d,aqf} || G_{aqf} || A_l)$ , representado na figura 2.26. Note que  $G_{scc,aqf}$  não possui componentes fortemente conexas não triviais em que  $x_d$  é incerto e  $x_l$  é de falha. Logo, a linguagem  $L(G_{aqf})$  é diagnosticável em relação a  $P_o$  e à falha  $tf$ .

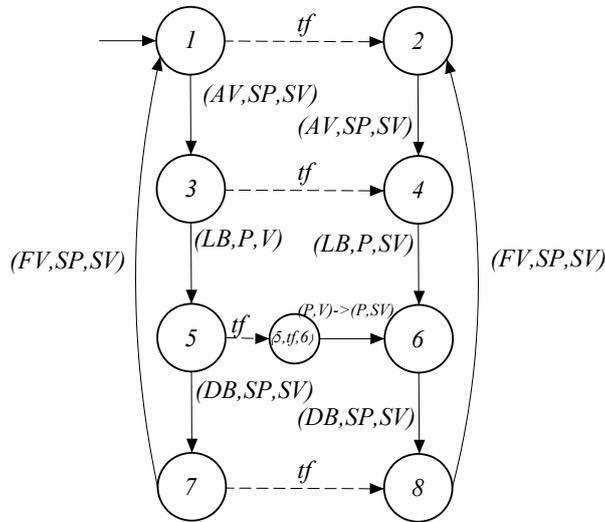


Figura 2.24: Autômato  $G_{aqf}$ , resultado da aplicação do MS a partir de  $\tilde{G}_{aqf}$  da figura 2.23 e do MDS da tabela 2.5 (exemplo 2.12).

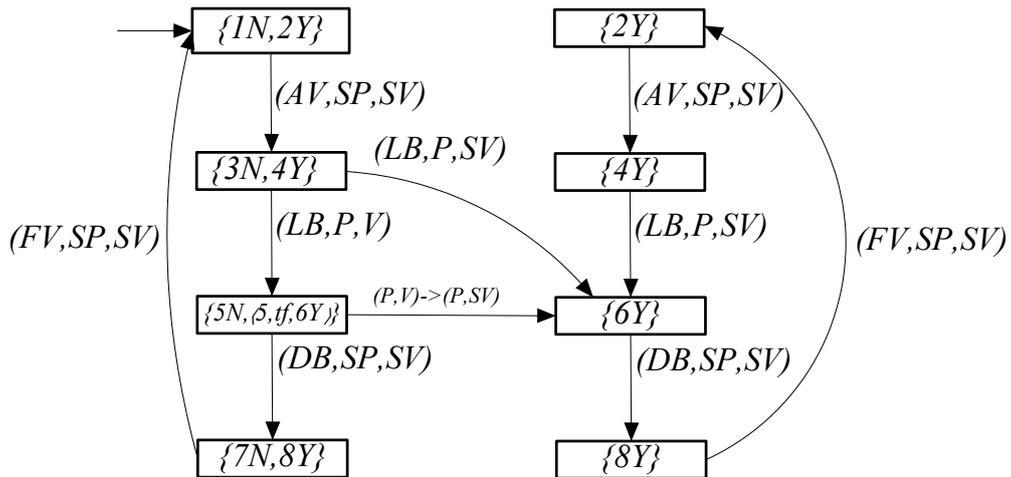


Figura 2.25: Autômato  $G_{d,aqf}$ , resultado do exemplo 2.12.

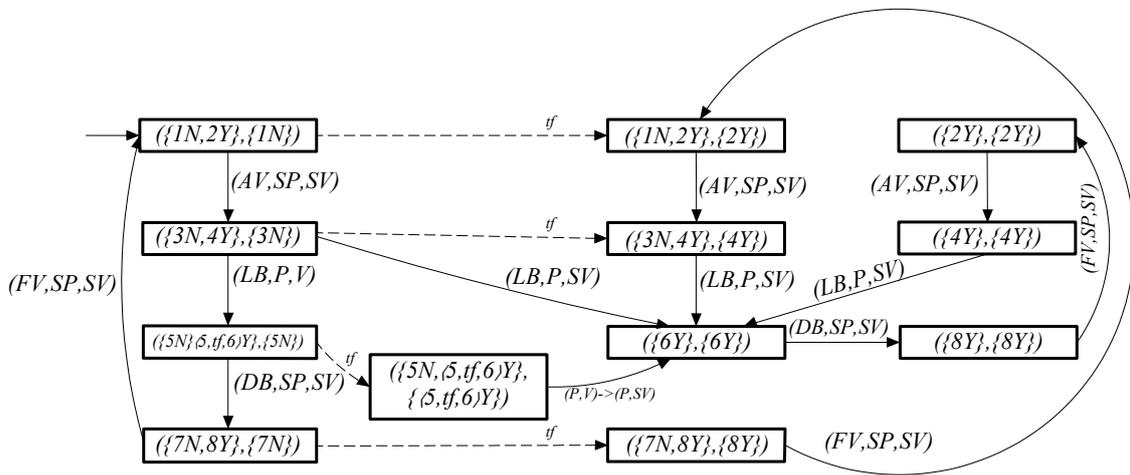


Figura 2.26: Autômato  $G_{scc,aqf}$  do exemplo 2.12.

Note que as transições entre os estados de um autômato obtido a partir do MS são consequências da combinação dos eventos dos componentes ativos e dos eventos das variáveis medidas pelos sensores, resultando em um evento cujas componentes são ações de comando e leituras dos sensores, como pode ser visto na figura 2.25; por exemplo, o evento  $(AV, SP, SV)$  é composto pelo comando  $AV$  e pelas leituras dos sensores  $SP$  e  $SV$ . Alguns problemas de detecção de falhas podem ocorrer por conta dessa característica. No autômato  $G_{d,aqf}$ , o estado inicial é  $\{1N, 2Y\}$ . Após a ocorrência do comando  $AV$ , as leituras dos sensores permanecem  $SP$  e  $SV$ , satisfazendo as condições para o evento  $(AV, SP, SV)$  ocorrer, que fará com que  $G_{d,aqf}$  mude para o estado  $\{3N, 4Y\}$ . Como os eventos ativos do estado  $\{3N, 4Y\}$  é  $\Gamma(\{3N, 4Y\}) = \{(LB, P, SV), (LB, P, V)\}$ , então se em uma determinada situação, após o comando  $LB$ , o sensor de pressão enviar o sinal  $P$  enquanto que o sensor de vazão ainda enviar o sinal  $SV$ , a transição com o evento  $(LB, P, SV)$  ocorrerá e o diagnosticador  $G_{d,aqf}$  evoluirá para o estado  $\{6Y\}$ , que é um estado certo de falha, e indicará para o sistema que a falha  $tf$  ocorreu, mesmo que ela não tenha acontecido. Assim sendo, o agrupamento das informações de comando com os sinais dos sensores em um único evento pode levar à detecção de falhas que não tenham ocorrido (falso-positivo).

## 2.9 Especificação de Linguagens

Em determinadas situações, a linguagem gerada por um autômato  $G$  deve ser modificada para cumprir um conjunto de especificações. A premissa é que determinado comportamento de  $G$  que não seja satisfatório, deve ser modificado. A modificação deve ser entendida como uma *restrição do comportamento para um subconjunto de  $L(G)$* . As especificações são interpretadas da seguinte maneira: elas restringem que a linguagem  $L(G)$  contenha sequências que não sejam aceitáveis por diversos motivos como, por exemplo, a violação de determinado comportamento de segurança ou condições que se deseja impor ao funcionamento do sistema.

A modelagem de especificações pode ser representada por autômatos que apresentam o comportamento desejado para o sistema [6, Cap. 3]. Esses autômatos são denotados por  $H_{spec}$  e a sua combinação com  $G$ , utilizando a composição paralela, resulta no autômato que modela o sistema com o comportamento admissível. Os eventos que podem ser executados em  $G$  mas não pertencem ao conjunto de eventos de  $H_{spec}$  são irrelevantes para a especificação que  $H_{spec}$  implementa.

Alguns casos padrões de especificações são: (i) estados ilegais; (ii) alternância de eventos; (iii) sequência ilegal; e (iv) desmembramento de estados. Na seção 3.2 desta dissertação será utilizado o desmembramento de estados para dividir os estados que são mapeados com mais de uma saída do mesmo sensor.

## 2.10 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos da teoria de sistemas a eventos discretos, as linguagens e os autômatos. Foram também revisados os conceitos de diagnose de falhas e o método do MS e a sua aplicação na diagnose de falhas. Foi observado que o agrupamento das informações de comando junto com os sinais dos sensores em um único evento pode provocar a detecção prematura e errônea de falhas. Além disso, outros trabalhos que abordam o diagnóstico de falhas em SEDs, como o diagnóstico robusto [4, 10], o diagnóstico descentralizado [5, 6, 9] e o diagnóstico descentralizado robusto [3], são aplicados aos autômatos partindo do princípio que os eventos gerados pelos sensores estão desacoplados dos eventos de comando. Portanto, não é possível utilizar estas metodologias diretamente em um autômato que foi obtido utilizando o MS. Considerando os fatores apresentados, é notória a necessidade de se introduzir um método para modelar um SED que promova a dissociação entre os eventos de comando e os eventos de leitura, além de estimar com maior precisão o estado do sistema.

## Capítulo 3

# Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL)

Neste capítulo será apresentado um novo mapeamento de sensores que denominaremos de Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL). O MS-IEL é um método que tem o objetivo de acrescentar as informações dos sensores do processo à modelagem de SEDs, assim como o MS que foi mostrado na seção 2.8. Porém, enquanto o MS renomeia os eventos do autômato  $\tilde{G}$  para integrar nele as informações dos sensores, o MS-IEL constrói os autômatos que modelam o comportamento dos sensores para serem integrados ao modelo através da operação de composição paralela, promovendo assim, a dissociação entre os eventos de comando dos componentes ativos e os eventos de leitura dos sensores.

A arquitetura da modelagem modular utilizando o MS-IEL será apresentada na seção 3.1. Nas seções 3.2 e 3.3, serão detalhados os módulos de Desmembramento de Estados e Criação de Estados, respectivamente, que constituem o MS-IEL. Na seção 3.4, o MS-IEL será aplicado ao sistema de aquecimento no qual o MS foi empregado no exemplo 2.13.

### 3.1 Arquitetura da Modelagem Modular Utilizando o MS-IEL

A arquitetura da modelagem modular de um SED utilizando o MS-IEL está ilustrada na figura 3.1. Como entradas, o MS-IEL recebe o autômato  $\tilde{G}$  e o Mapa de Sensores (MDS). O autômato  $\tilde{G}$  é obtido a partir da composição paralela entre os autômatos que modelam os componentes ativos do sistema, como, por exemplo válvulas, bombas, atuadores e etc, conforme foi descrito na seção 2.8. Embora

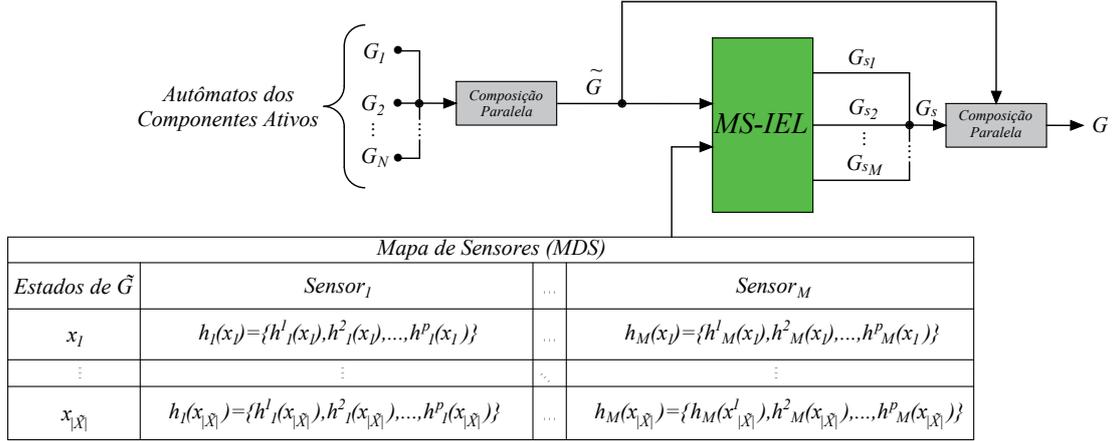


Figura 3.1: Arquitetura da modelagem modular de SED utilizando o MS-IEL.

o MDS já tenha sido apresentado na seção 2.8, ele será aqui estendido para que mais de um elemento do conjunto  $Y_j$ , que é o conjunto que contém todas as saídas discretas possíveis do sensor  $j$ , possa ser atribuído a  $h_j(x_i)$ , ou seja,  $h_j(x_i)$  poderá ser escrito na forma  $h_j(x_i) = \{h_j^1(x_i), h_j^2(x_i), \dots, h_j^k(x_i), \dots, h_j^p(x_i)\}$ , em que  $h_j^k(x_i)$  é a  $k$ -ésima saída possível do sensor  $j$  para o estado  $x_i$ , e  $p$  é o número de mapeamento possível. Isso permite que o MS-IEL tenha a capacidade de construir autômatos de sensores mesmo nas situações em que o comportamento de determinado sensor não seja completamente definido para algum estado de  $\tilde{G}$ , o que pode ocorrer tanto por falta de informações sobre todos os componentes e variáveis que influenciam no comportamento desse sensor como também em função da abstração da modelagem do SED do sistema. Por exemplo, considere um sistema composto por um tanque, uma válvula e um transdutor de nível, ilustrado na figura 3.2.

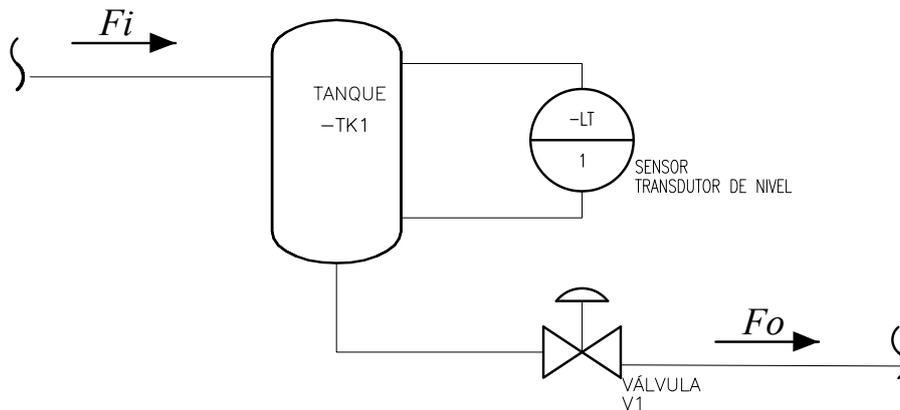


Figura 3.2: Sistema simplificado composto por um tanque, uma válvula e um transdutor de nível.

Considere a seguinte abstração do sinal do transdutor de nível: *nível estável*, *nível subindo* e *nível descendo*; estas duas últimas são obtidas comparando-se o

valor atual do nível com o valor medido no instante anterior. Suponha que a vazão de entrada  $F_i$  seja sempre maior que zero e que varie ao longo do tempo em uma função desconhecida. Suponha, ainda, que quando a válvula  $V_1$  está totalmente aberta a vazão de saída  $F_o$  seja maior do que  $F_i$ ; logo, nesse caso, o nível do tanque irá reduzir. Vamos, agora, mapear as saídas de acordo com os estados dos componentes do sistema. O MDS do sensor de nível para o estado da válvula  $V_1$  totalmente aberta será  $h_{\text{sensor\_nível}}(\text{válvula totalmente aberta}) = (\text{nível descendo})$  e quando  $V_1$  estiver totalmente fechada, o nível irá aumentar; logo  $h_{\text{sensor\_nível}}(\text{válvula totalmente fechada}) = (\text{nível subindo})$ . Note, porém, que não será possível definir o comportamento do nível quando a válvula estiver parcialmente aberta, podendo o sensor fornecer a informação de que o nível está subindo, descendo ou estável, logo  $h_{\text{sensor\_nível}}(\text{válvula parcialmente aberta}) = (\text{nível descendo, nível subindo, nível estável})$ .

O MS-IEL é dividido internamente em dois módulos: (i) Desmembramento de Estados; e (ii) Criação de Estados. Esses módulos são aplicados para cada sensor  $j$  do MDS, conforme ilustrados na figura 3.3. Para cada sensor  $j$ , o MS-IEL apresenta como saída um autômato que modela o seu comportamento, denotado por  $G_{s_j}$ . O conjunto de todos os autômatos de sensores é  $G_s = \{G_{s_1}, G_{s_2}, \dots, G_{s_M}\}$ . Será convencionalizado que qualquer evento  $\sigma$  que represente alguma informação de sensor representará uma transição de nível baixo para o nível alto ou de nível alto para o nível baixo do sinal desse sensor, ou seja, estará associado a bordas de subida ou descida. Os módulos Desmembramento de Estados e Criação de Estados serão apresentados na seção 3.2 e 3.3, respectivamente.

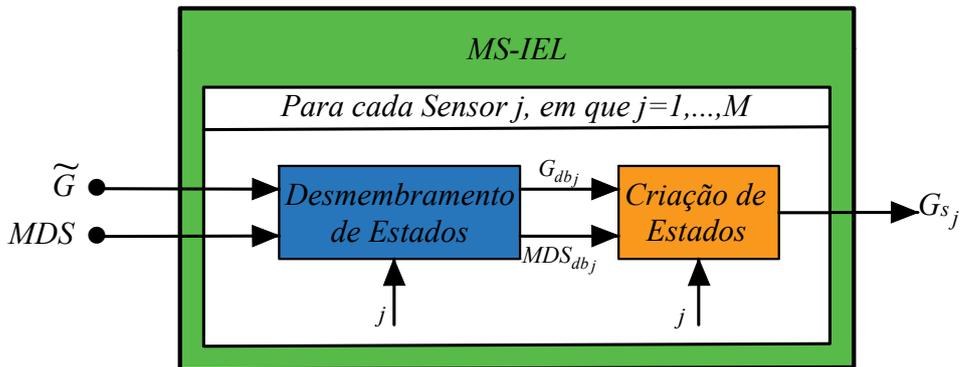


Figura 3.3: Módulos do MS-IEL.

## 3.2 Desmembramento de Estados do MS-IEL

O módulo Desmembramento de Estados tem a função de desmembrar os estados de  $\tilde{G}$  que foram mapeados com mais de um elemento do conjunto  $Y_j$ , ou seja, dividir o estado  $x_i$  cujo MDS seja tal que  $|h_j(x_i)| > 1$ .

**Exemplo 3.1** Considere o autômato  $\tilde{G}$  da figura 3.4 que representa o resultado da composição paralela dos autômatos que modelam os componentes ativos de um sistema. O seu conjunto de eventos é  $\tilde{\Sigma} = \{p, q, r\}$ , em que  $q$  representa uma falha do sistema, logo  $\tilde{\Sigma}_f = \{q\}$ . O MDS para o autômato  $\tilde{G}$  está descrito na tabela 3.1, ele contém o mapeamento das leituras do Sensor 1 para cada estado de  $\tilde{G}$ , em que  $Y_1 = \{A, B\}$ . Observe no MDS que, o mapeamento do estado 0 apresenta ambos os valores  $A$  e  $B$ , o estado 1, apenas o valor  $B$  e no estado 2, a saída do Sensor 1 é  $A$ .

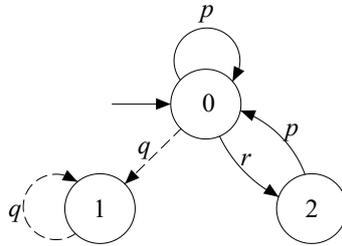


Figura 3.4: Autômato  $\tilde{G}$ .

Tabela 3.1: MDS para o autômato  $\tilde{G}$  da figura 3.4.

Estados de $\tilde{G}$	Sensor 1
0	A;B
1	B
2	A

O algoritmo 3.1 implementa o módulo de Desmembramento de Estados. O objetivo desse algoritmo é separar os estados do autômato  $\tilde{G}$  que foram mapeados com mais de uma saída de determinado sensor  $j$ . Ao fim desse algoritmo, cada estado do autômato  $G_{db_j}$  resultante, possuirá em seu  $MDS_{db_j}$ , uma única saída mapeada para o sensor  $j$ . O desmembramento dos estados de  $\tilde{G}$  é uma preparação do autômato  $\tilde{G}$  antes da etapa seguinte do MS-IEL, o módulo de Criação de Estados.

As entradas do algoritmo 3.1 são, o autômato  $\tilde{G}$ , o mapa MDS e o índice  $j$  do sensor, e as saídas são, o autômato desmembrado  $G_{db_j}$  e o  $MDS_{db_j}$ . Nos passos 2 e 3 do algoritmo 3.1,  $G_{db_j}$  e  $MDS_{db_j}$  são inicializados e iguados a  $\tilde{G}$  e ao MDS, respectivamente. No passo 5, cada estado  $x_i \in \tilde{X}$ , que satisfaça  $|h_j(x_i)| > 1$ , deve

ser desmembrado. Nesse desmembramento, para o  $k$ -ésimo elemento pertencente ao conjunto  $h_j(x_i)$  é criado um novo estado desmembrado  $x_{desmembrado} = \langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$ , (passo 7), o qual é adicionado ao conjunto de estados  $X_{db_j}$  (passo 8) e ao mapa  $MDS_{db_j}$  juntamente com a saída  $h_j^k(x_i)$  (passo 9). Nos passos de 10 a 21, as transições do estado  $x_i$  do autômato  $\tilde{G}$  são copiadas para os estados  $x_{desmembrado}$  em  $G_{db_j}$ . Essa cópia de transições acontece em duas etapas: na primeira etapa são consideradas as transições que possuem o estado  $x_i$  como origem no autômato  $\tilde{G}$  e na segunda etapa são consideradas as transições que possuem o estado  $x_i$  como destino em  $\tilde{G}$ . Na primeira etapa quando a cópia das transições  $x_i \xrightarrow{\sigma} y \in \tilde{G}$  para  $G_{db_j}$  é realizada, duas condições são observadas: (i) se  $x_i = y$ , essa transição é um auto laço em  $x_i$  (passo 11), sendo então, criado um auto laço no autômato  $G_{db_j}$  com a transição  $x_{desmembrado} \xrightarrow{\sigma} x_{desmembrado}$  (passo 12); (ii) caso contrário, quando  $x_i \neq y$  (passo 15), a transição  $x_{desmembrado} \xrightarrow{\sigma} y$  é criada em  $G_{db_j}$  (passo 15). Na segunda etapa, para cada transição  $y \xrightarrow{\sigma} x_i \in \tilde{G}$  em que  $x_i \neq y$  é criada uma nova transição  $y \xrightarrow{\sigma} x_{desmembrado}$  em  $G_{db_j}$  (passo 19). Note que quando  $x_i = y$ , nenhuma transição é criada já que o auto laço relativo a essa transição foi adicionado no passo 12.

No passo 23, é verificado se o estado  $x_i$  é o estado inicial do autômato  $\tilde{G}$ . Em caso positivo, cria-se um novo estado inicial em  $G_{db_j}$ , denominado  $x_{i_{new}}$ , o qual é adicionado ao conjunto  $X_{db_j}$  (passo 24) e ao mapa  $MDS_{db_j}$  com rótulo  $SL$  (Sem Leitura) (passo 25), significando que nenhuma leitura do sensor foi obtida nesse estado. Além disso, são criadas transições rotuladas por  $\varepsilon$  do estado  $x_{i_{new}}$  para cada estado  $\langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$  que foi desmembrado a partir do estado  $x_i$  e do conjunto  $h_j(x_i)$  (passo 27). No passo 29, o estado  $x_i$  deixa de ser o estado inicial do autômato  $G_{db_j}$  e no passo 30, o estado  $x_{i_{new}}$  é transformado em estado inicial de  $G_{db_j}$ . O processo de criação dos estados desmembrados relativos ao estado  $x_i \in G_{db_j}$  termina no passo 32 do algoritmo 3.1.

A próxima etapa do algoritmo é criar as transições rotuladas por  $\varepsilon$  entre os estados que foram criados devido ao desmembramento do passo 5 ao passo 32. Essas transições são criadas a cada dois estados desmembrados. O primeiro estado é denominado de  $desmembrado_1$  e o segundo de  $desmembrado_2$ , e sempre que eles forem diferentes entre si, é criada a transição  $desmembrado_1 \xrightarrow{\varepsilon} desmembrado_2$  (passo 41). A última etapa do algoritmo 3.1 é excluir do autômato  $G_{db_j}$  as transições que possuem o estado  $x_i$  como origem (passo 46), as transições que possuem o estado  $x_i$  como destino (passo 49) e o próprio estado  $x_i$  (passo 52). Após percorrer todos os estados de  $\tilde{G}$ , o autômato  $G_{db_j}$  e o mapa  $MDS_{db_j}$  estarão finalizados e serão retornados pelo algoritmo 3.1 no passo 54. O exemplo 3.2 ilustra a execução do algoritmo 3.1.

---

**Algoritmo 3.1:** Desmembramento de Estados

---

**Entrada:**

- $\tilde{G} = (\tilde{X}, \tilde{\Sigma}, \tilde{f}, \tilde{\Gamma}, \tilde{x}_0, \tilde{X}_m)$
- $MDS$ : Mapa de Sensores;
- $j$ : índice do sensor.

**Saída:**

- $G_{db_j} = (X_{db_j}, \Sigma_{db_j}, f_{db_j}, \Gamma_{db_j}, x_{0,db_j}, X_{m,db_j})$
- $MDS_{db_j}$

```
1 início
2    $G_{db_j} \leftarrow \tilde{G}$ 
3    $MDS_{db_j} \leftarrow MDS$ 
4   para cada estado  $x_i \in \tilde{X}$  faça
5     se  $|h_j(x_i)| > 1$  então
6       para cada  $h_j^k(x_i) \in h_j(x_i)$  faça
7          $x_{desmembrado} \leftarrow \langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$ 
8          $X_{db_j} \leftarrow X_{db_j} \cup x_{desmembrado}$ 
9         adiciona em  $MDS_{db_j}$  o estado  $x_{desmembrado}$  e a sua saída
           $h_j^k(x_i)$ 
10        para cada transição  $x_i \xrightarrow{\sigma} y \in \tilde{G}$  faça
11          se  $x_i = y$  então
12             $f_{db_j}(x_{desmembrado}, \sigma) \leftarrow x_{desmembrado}$ 
13          fim
14          se não
15             $f_{db_j}(x_{desmembrado}, \sigma) \leftarrow y$ 
16          fim
17        para cada transição  $y \xrightarrow{\sigma} x_i \in \tilde{G}$  faça
18          se  $x_i \neq y$  então
19             $f_{db_j}(y, \sigma) \leftarrow x_{desmembrado}$ 
20          fim
21        fim
22      fim
23      se  $x_i = \tilde{x}_0$  então
24         $X_{db_j} \leftarrow X_{db_j} \cup x_{i_{new}}$ 
25        adiciona em  $MDS_{db_j}$  o estado  $x_{i_{new}}$  e a saída  $h_j(x_{i_{new}}) \leftarrow$ SL
26        para cada  $h_j^k(x_i) \in h_j(x_i)$  faça
27           $f_{db_j}(x_{i_{new}}, \varepsilon) \leftarrow \langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$ 
28        fim
29         $x_{0,db_j} \leftarrow x_{0,db_j} \setminus x_i$ 
30         $x_{0,db_j} \leftarrow x_{0,db_j} \cup x_{i_{new}}$ 
31      fim
32    fim
```

---

---

```

34
35
36   para cada  $h_j^k(x_i) \in h_j(x_i)$  faça
37      $desmembrado_1 \leftarrow \langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$ 
38     para cada  $h_j^k(x_i) \in h_j(x_i)$  faça
39        $desmembrado_2 \leftarrow \langle x_i, h_j^k(x_i) \rangle$ 
40       se  $desmembrado_1 \neq desmembrado_2$  então
41          $f_{db_j}(desmembrado_1, \varepsilon) \leftarrow desmembrado_2$ 
42       fim
43     fim
44   fim
45   para cada transição  $x_i \xrightarrow{\sigma} y \in G_{db_j}$  faça
46      $f_{db_j}(x_i, \sigma) \rightarrow indefinido$ 
47   fim
48   para cada transição  $y \xrightarrow{\sigma} x_i \in G_{db_j}$  faça
49      $f_{db_j}(y, \sigma) \rightarrow indefinido$ 
50   fim
51   retira de  $MDS_{db_j}$  o estado  $x_i$  e a saída  $h_j(x_i)$ 
52    $X_{db_j} \leftarrow X_{db_j} \setminus x_i$ 
53 fim
54 retorna  $[G_{db_j}, MDS_{db_j}]$ 
55 fim

```

---

**Exemplo 3.2** Vamos ilustrar a execução do módulo de Desmembramento de Estados utilizando o algoritmo 3.1. O algoritmo é inicializado com as seguintes entradas: o autômato  $\tilde{G}$  da figura 3.4, o mapa MDS da tabela 3.1 e  $j = 1$ . Nos passos 2 e 3, respectivamente, são criados o autômato  $G_{db_1} = \tilde{G}$  e a tabela  $MDS_{db_1} = MDS$ . Como no estado 0,  $|h_1(0)| > 1$ , ele deve ser desmembrado (passo 5). Note que  $h_1^1(0) = A$  e  $h_1^2(0) = B$ . Assim, para a saída  $h_1^1(0)$ , é criado o estado  $\langle 0, A \rangle$  (passo 7) que é adicionado ao autômato  $G_{db_1}$  (passo 8) e também ao  $MDS_{db_1}$ , em que  $h_1(\langle 0, A \rangle) = A$  (passo 9), conforme mostrado na tabela 3.2. Em seguida, nos passos de 10 a 21, as transições do estado 0 do autômato  $\tilde{G}$  são copiadas para o estado  $\langle 0, A \rangle$  no autômato  $G_{db_1}$ , conforme destaque em verde na figura 3.5. Note que para cada transição que parte do estado 0 em  $\tilde{G}$ , é criada uma transição semelhante em  $G_{db_1}$ , com a diferença que o estado de origem é o  $\langle 0, A \rangle$  (passos de 10 a 16). Por exemplo, o autômato  $\tilde{G}$  possui três transições que partem do estado 0:  $0 \xrightarrow{p} 0$ ,  $0 \xrightarrow{q} 1$  e  $0 \xrightarrow{r} 2$ . Logo, são criadas as transições  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{p} \langle 0, A \rangle$ ,  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} 1$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{r} 2$  no autômato  $G_{db_1}$ . Note que o auto laço  $0 \xrightarrow{p} 0$  do  $\tilde{G}$  foi espelhado em  $G_{db_1}$  com a transição  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{p} \langle 0, A \rangle$  por conta da condição do passo 11 e da instrução do passo 12. Em seguida, para cada transição que tem como destino o estado 0 em  $\tilde{G}$ , é criada uma transição similar em  $G_{db_1}$  com o mesmo estado de origem mas com o estado  $\langle 0, A \rangle$  como destino (passos de 19 a 21). Por exemplo, duas transições possuem o estado 0 como destino no autômato  $\tilde{G}$ , a primeira é o auto laço  $0 \xrightarrow{p} 0$  que já foi inserido em  $G_{db_1}$  no passo 12, e, portanto, não deve ser novamente introduzida, o que é evitado pela condição do passo 18. A segunda é a transição  $2 \xrightarrow{p} 0$ , nesse caso, o algoritmo cria a transição  $2 \xrightarrow{p} \langle 0, A \rangle$  no autômato  $G_{db_1}$ .

Em seguida, para a outra saída do estado 0, que é  $h_1^2(0) = B$ , são executados os passos 7 a 22, nos quais é criado o estado  $\langle 0, B \rangle$  e são inseridas as transições  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{p} \langle 0, B \rangle$ ,  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{q} 1$ ,  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{r} 2$  e  $2 \xrightarrow{p} \langle 0, B \rangle$  em  $G_{db_1}$ , conforme está destacado em azul na figura 3.5. O autômato  $G_{db_1}$  e o  $MDS_{db_1}$  construídos até o passo 22 estão ilustrados na figura 3.5 e na tabela 3.2, respectivamente.

Tabela 3.2:  $MDS_{db_1}$  parcial para o autômato  $G_{db_1}$  da figura 3.5 até o passo 22 do algoritmo 3.1.

Estados de $G_{db_1}$	Sensor 1
0	A;B
1	B
2	A
$\langle 0, A \rangle$	A
$\langle 0, B \rangle$	B

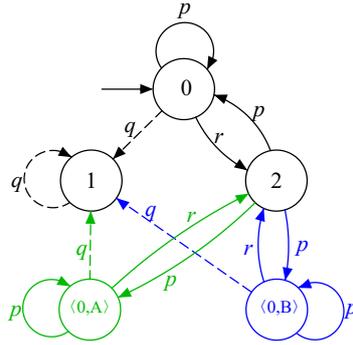


Figura 3.5: Resultado parcial do autômato  $G_{db_1}$  até o passo 22 do algoritmo 3.1 no exemplo 3.1.

No passo 23 verifica-se que, como o estado 0, que foi desmembrado, é o estado inicial do autômato  $\tilde{G}$ , deve-se criar um novo estado  $x_{i_{new}} = 0_{new}$  em  $G_{db_1}$  no passo 24. O novo estado também é adicionado ao  $MDS_{db_1}$  em que  $h_1(0_{new}) = SL$  (passo 25), ver tabela 3.3. O  $SL$  é um valor genérico para o estado inicial e simboliza que nenhuma leitura do sensor foi lida nesse estado. Do passo 26 ao passo 28, são adicionadas transições  $\varepsilon$  a partir do estado  $0_{new}$  para os estados  $\langle 0, A \rangle$  e  $\langle 0, B \rangle$ . No passo 29, o estado 0 é excluído do conjunto  $x_{0_{ab_1}}$  de  $G_{db_1}$  e deixa de ser o estado inicial. No passo 30, o estado  $0_{new}$  é adicionado ao conjunto  $x_{0_{ab_1}}$  e torna-se um estado inicial do autômato  $G_{db_1}$ . A construção parcial do autômato  $G_{db_1}$  e do  $MDS_{db_1}$  até o passo 32 do algoritmo 3.1 está ilustrada na figura 3.6, com as novas alterações destacadas em azul, e na tabela 3.3, respectivamente.

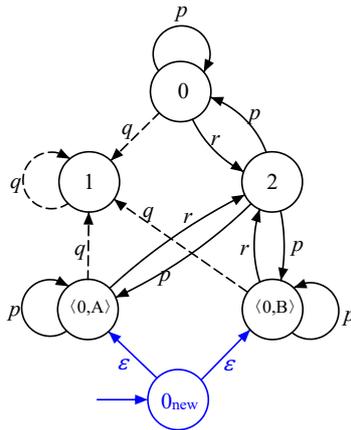


Figura 3.6: Resultado parcial do autômato  $G_{db_1}$  até o passo 32 do algoritmo 3.1 no exemplo 3.1.

Tabela 3.3:  $MDS_{db_1}$  parcial para o autômato  $G_{db_1}$  da figura 3.6 até o passo 32 do algoritmo 3.1.

Estados de $G_{db_1}$	Sensor 1
0	A;B
1	B
2	A
$\langle 0, A \rangle$	A
$\langle 0, B \rangle$	B
$0_{new}$	$SL$

Do passo 36 ao passo 44 são criadas as transições  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{\epsilon} \langle 0, B \rangle$  e  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{\epsilon} \langle 0, A \rangle$ , destacadas em azul na figura 3.7. A exclusão das transições de origem e de destino do estado 0 é realizada entre os passos 45 a 50 e a exclusão do estado 0 acontece no passo 52. Por fim, obtém-se o autômato  $G_{db_1}$  e o mapa  $MDS_{db_1}$ , ilustrados na figura 3.7 e na tabela 3.4, respectivamente.

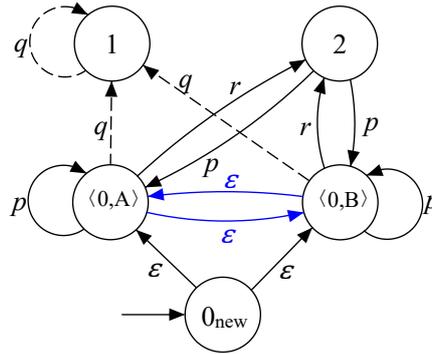


Figura 3.7: Autômato  $G_{db_1}$  final do exemplo 3.1.

Tabela 3.4:  $MDS_{db_1}$  final para o autômato  $G_{db_1}$  da figura 3.7.

Estados de $G_{db_1}$	Sensor 1
1	B
2	A
$\langle 0, A \rangle$	A
$\langle 0, B \rangle$	B
$0_{new}$	$SL$

Note no  $MDS_{db_1}$  da tabela 3.4 que cada estado de  $G_{db_1}$  possui apenas uma saída do Sensor 1 associada e que o estado 0, que foi mapeado com as saídas A e B, foi desmembrado nos estados  $\langle 0, A \rangle$  e  $\langle 0, B \rangle$ , respectivamente, foi excluído de  $G_{db_1}$ .

**Proposição 3.1**  $L(\tilde{G}) = L(\text{Obs}(G_{db_j}, \Sigma_{db_j} \setminus \{\varepsilon\}))^1$ .

**Prova 3.1** *Por construção, caso o mapeamento de um sensor  $j$  para o estado  $x_i$  do autômato  $\tilde{G}$  possua mais de uma saída, ou seja,  $h(x_i) = \{h_j^1(x_i), h_j^2(x_i), \dots, h_j^p(x_i)\}$ , o estado  $x_i$  é desmembrado em  $\langle x_i, h_j^1(x_i) \rangle, \langle x_i, h_j^2(x_i) \rangle, \dots, \langle x_i, h_j^p(x_i) \rangle$ , com a palavra nula  $\varepsilon$  interligando esses estados e todas as transições do estado  $x_i$  são copiadas para os respectivos estados desmembrados. Assim, ao calcular  $\text{Obs}(G_{db_j}, \Sigma_{db_j} \setminus \{\varepsilon\})$ , os estados desmembrados serão reagrupados por pertencerem ao alcance não observável em relação ao conjunto  $\Sigma_{db_j} \setminus \varepsilon$ . ■*

Ao final do módulo de Desmembramento de Estados, o autômato  $G_{db_1}$  e o mapa  $MDS_{db_1}$  estão preparados para serem utilizados como entradas do módulo de Criação de Estados, no qual será realizada a construção do autômato de sensor.

### 3.3 Criação de Estados do MS-IEL

O módulo de Criação de Estados do MS-IEL (ver figura 3.3), é responsável por criar, a partir do autômato  $G_{db_j}$  e do mapa  $MDS_{db_j}$ , o autômato  $G_{s_j}$ ,  $j = 1 \dots M$ , que modela o comportamento do  $j$ -ésimo sensor. O módulo de Criação de Estados é implementado pelo algoritmo 3.2 que possui como entradas o autômato  $G_{db_j}$ , o mapa  $MDS_{db_j}$  e o índice  $j$  do sensor e, como saída, o autômato  $G_{s_j}$ .

O objetivo do algoritmo 3.2 é inserir as informações dos sensores, que estão mapeadas no  $MDS_{db_j}$  no autômato  $G_{db_j}$  para, através da criação de estados e transições com eventos de leituras dos sensores, obter o autômato  $G_{s_j}$ . Esse algoritmo considera o comportamento de falha do autômato  $G_{db_j}$  para que as suas características modeladas não sejam modificadas durante a construção do autômato  $G_{s_j}$ .

Iniciando o algoritmo 3.2, no passo 2 é criado o autômato  $G_{s_j} = G_{db_j}$ . Em seguida, é percorrida cada transição  $x \xrightarrow{\sigma} y$  de  $G_{db_j}$  e, se  $h_j(x) \neq h_j(y)$ , então: (i) a transição é excluída de  $G_{s_j}$  (passo 5); (ii) um estado  $x_{new} = \langle x, \sigma, y \rangle$  (passo 6) é adicionado a  $G_{s_j}$  (passo 7); e (iii) são criadas duas novas transições:

1.  $x \xrightarrow{\sigma} x_{new}$  (passo 8); e
2.  $x_{new} \xrightarrow{h_j(y)} y$  (passo 9).

---

<sup>1</sup>A notação  $\text{Obs}(G, \Sigma_1)$  representa o observador do autômato  $G$  em relação ao conjunto  $\Sigma_1$ .

---

**Algoritmo 3.2:** Criação de Estados

---

**Entrada:**

- $G_{db_j} = (X_{db_j}, \Sigma_{db_j}, f_{db_j}, \Gamma_{db_j}, x_{db_j}, X_{m,db_j})$ , em que  $\Sigma_{f,db_j} \subseteq \Sigma_{db_j}$
- $MDS_{db_j}$
- $j$ : índice do sensor

**Saída:**

- $G_{s_j} = (X_{s_j}, \Sigma_{s_j}, f_{s_j}, \Gamma_{s_j}, x_{s_j}, X_{m,s_j})$

```
1 início
2    $G_{s_j} \leftarrow G_{db_j}$ 
3   para cada transição  $x \xrightarrow{\sigma} y \in G_{db_j}$  faça
4     se  $h_j(x) \neq h_j(y)$  então
5        $f_{s_j}(x, \sigma) \leftarrow \text{indefinido}$ 
6        $x_{new} \leftarrow \langle x, \sigma, y \rangle$ 
7        $X_{s_j} \leftarrow X_{s_j} \cup x_{new}$ 
8        $f_{s_j}(x, \sigma) \leftarrow x_{new}$ 
9        $f_{s_j}(x_{new}, h_j(y)) \leftarrow y$ 
10      para cada transição  $y \xrightarrow{\alpha} z \in G_{db_j}$  faça
11        se  $(\alpha \in \Sigma_{f,db_j}) \& (\alpha \neq \sigma)$  então
12          se  $h_j(x) \neq h_j(z)$  então
13             $x'_{new} \leftarrow \langle x_{new}, \alpha, z \rangle$ 
14             $X_{s_j} \leftarrow X_{s_j} \cup x'_{new}$ 
15             $f_{s_j}(x_{new}, \alpha) \leftarrow x'_{new}$ 
16             $f_{s_j}(x'_{new}, h_j(z)) \leftarrow z$ 
17          fim
18          se não
19             $f_{s_j}(x_{new}, \alpha) \leftarrow z$ 
20          fim
21        fim
22      fim
23    fim
24     $G_{s_j} \leftarrow \text{Obs}(G_{s_j}, \Sigma_{s_j} \setminus \{\varepsilon\})$ 
25    retorna  $G_{s_j}$ 
26 fim
```

---

Do passo 10 ao passo 21 são construídas as transições com eventos de falhas a partir do novo estado  $x_{new}$  que foi adicionado ao autômato  $G_{s_j}$ . Assim, no mesmo laço da transição  $x \xrightarrow{\sigma} y \in G_{db_j}$ , é verificado na transição  $y \xrightarrow{\alpha} z \in G_{db_j}$  se  $\alpha \in \Sigma_{f,db_j}$  e se  $\alpha \neq \sigma$  (passo 11). Dois casos devem ser considerados. No primeiro caso, se  $h_j(x) \neq h_j(z)$  (passo 12), então cria-se um novo estado  $x'_{new} = \langle x_{new}, \alpha, z \rangle$  (passo 13) que é adicionado ao  $G_{s_j}$  (passo 14) e na sequência são criadas duas novas transições:

1.  $x_{new} \xrightarrow{\alpha} x'_{new}$  (passo 15); e
2.  $x'_{new} \xrightarrow{h_j(z)} z$  (passo 16).

No segundo caso, se  $h_j(x) = h_j(z)$  (passo 18), então a transição a ser inserida em  $G_{s_j}$  será  $x_{new} \xrightarrow{\alpha} z$  (passo 19).

Após percorrer todas as transições do autômato  $G_{db_j}$  e inserir estados e transições em  $G_{s_j}$  de acordo com o  $MDS_{db_j}$ , no passo 24 é construído um autômato determinístico  $Obs(G_{s_j}, \Sigma_{db_j} \setminus \{\varepsilon\})$ . Por fim, no passo 25, o autômato  $G_{s_j}$  será retornado pelo algoritmo 3.2. No exemplo a seguir é aplicado o algoritmo 3.2 com o intuito de ilustrar a construção do autômato  $G_{s_j}$ .

**Exemplo 3.3** Neste exemplo iremos utilizar o algoritmo 3.2 para construir o autômato  $G_{s_1}$  utilizando o módulo de Criação de Estados. Como entradas serão utilizados o autômato  $G_{db_1}$  e o  $MDS_{db_1}$ , obtidos no exemplo 3.1, representados na figura 3.7 e na tabela 3.4, e repetidos na figura 3.8 e na tabela 3.5. É importante lembrar que o Sensor 1 possui o conjunto de saídas  $Y_1 = \{A, B\}$ .

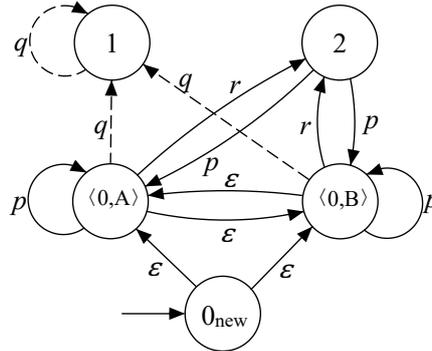


Figura 3.8: Autômato  $G_{db_1}$  final do exemplo 3.1.

No passo 2 do algoritmo 3.2 é criado um novo autômato  $G_{s_1} = G_{db_1}$ . Na sequência, entre os passos 3 e 23, percorrem-se todas as transições do autômato  $G_{db_1}$  e, de acordo com o  $MDS_{db_1}$ , é possível fazer modificações nas transições do autômato  $G_{s_1}$  conforme descrito a seguir.

1. As transições  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{p} \langle 0, A \rangle$ ,  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{r} 2$ ,  $2 \xrightarrow{p} \langle 0, A \rangle$ ,  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{p} \langle 0, B \rangle$ ,  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{q} 1$  e  $1 \xrightarrow{q} 1$  são do tipo  $h_1(\text{estado de origem}) = h_1(\text{estado de destino})$ ,

Tabela 3.5:  $MDS_{db_1}$  final para o autômato  $G_{db_1}$  da figura 3.8.

Estados de $G_{db_1}$	Sensor 1
1	B
2	A
$\langle 0, A \rangle$	A
$\langle 0, B \rangle$	B
$0_{new}$	SL

como pode ser constatado no autômato  $G_{db_1}$  da figura 3.8 e no  $MDS_{db_1}$  da tabela 3.5. Essas transições não satisfazem a condição do passo 4 e, portanto, de acordo com o algoritmo 3.2, não devem ser alteradas;

2. As transições  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{r} 2$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} 1$  satisfazem a condição do passo 4, mas não satisfazem a condição do passo 11 por motivos diferentes. Na transição  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{r} 2$  não existe evento de falha ativo no estado 2 ( $\Gamma_{db_1}(2) = \{p\}$ ), enquanto que na transição  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} 1$ , o evento de falha que está ativo no estado 1 ( $\Gamma_{db_1}(1) = \{q\}$ ) é o próprio evento  $q$  da transição  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} 1$ . Essas duas transições ( $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{r} 2$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} 1$ ) devem ser excluídas no passo 5 e novos estados  $\langle \langle 0, B \rangle, r, 2 \rangle$  e  $\langle \langle 0, A \rangle, q, 1 \rangle$  devem ser criados no passo 6, e adicionados ao autômato  $G_{s_1}$  no passo 7. Duas novas transições são então criadas:  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{r} \langle \langle 0, B \rangle, r, 2 \rangle$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{q} \langle \langle 0, A \rangle, q, 1 \rangle$  (passo 8). Em seguida, são criadas mais duas transições:  $\langle \langle 0, B \rangle, r, 2 \rangle \xrightarrow{A} 2$  e  $\langle \langle 0, A \rangle, q, 1 \rangle \xrightarrow{B} 1$  (passo 9). O resultado parcial do autômato  $G_{s_1}$  está representado na figura 3.9 em que as novas alterações estão destacadas em azul.
3. A transição  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, A \rangle$  satisfaz as condições do passo 4, já que  $h(\langle 0, B \rangle) = B \neq A = h(\langle 0, A \rangle)$ , e do passo 11 pois o evento de falha  $q$ , está ativo no estado  $\langle 0, A \rangle$  ( $q \in \Gamma_{db_1}(\langle 0, A \rangle) = \{p, q, r\}$ ) e o evento  $q$  não é o mesmo da transição  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, A \rangle$ . Contudo essa transição não atende à condição do passo 12 pois  $h(\langle 0, B \rangle) = h(1) = B$ . Assim, a transição  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, A \rangle$  é excluída no passo 5, o estado  $\langle \langle 0, B \rangle, \varepsilon, \langle 0, A \rangle \rangle$  é criado no passo 6 e é adicionado ao autômato  $G_{s_1}$  no passo 7. Uma nova transição  $\langle 0, B \rangle \xrightarrow{\varepsilon} \langle \langle 0, B \rangle, \varepsilon, \langle 0, A \rangle \rangle$  é criada no passo 8, e, em seguida, no passo 9, é criada a transição  $\langle \langle 0, B \rangle, \varepsilon, \langle 0, A \rangle \rangle \xrightarrow{A} \langle 0, A \rangle$  e no passo 19 é criada a transição  $\langle \langle 0, B \rangle, \varepsilon, \langle 0, A \rangle \rangle \xrightarrow{q} 1$ . Na figura 3.10 está ilustrado o autômato  $G_{s_1}$  após as alterações dos itens 2 (em azul) e 3 (em verde). Note que a transição  $\langle \langle 0, B \rangle, \varepsilon, \langle 0, A \rangle \rangle \xrightarrow{q} 1$  mantém o comportamento de falha existente no estado  $\langle 0, B \rangle$  antes do evento  $A$  proveniente do Sensor 1.
4. As transições  $0_{new} \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, A \rangle$ ,  $0_{new} \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, B \rangle$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{\varepsilon} \langle 0, B \rangle$  satis-

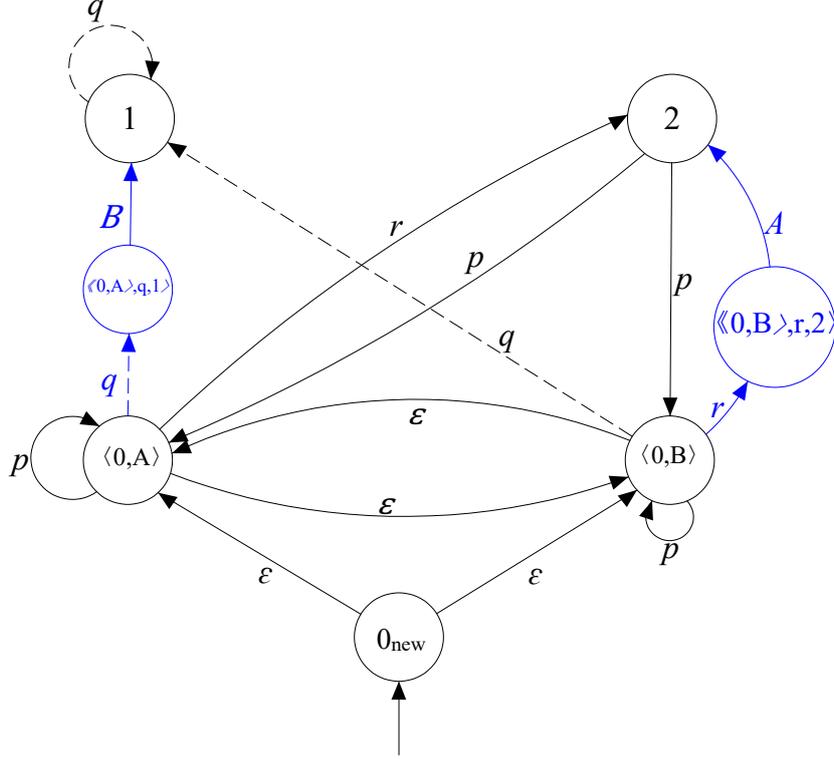


Figura 3.9: Parcial do autômato  $G_{s_1}$  após alterações do item 2 (em azul).

fazem as condições do passo 4, do passo 11 e do passo 12, respectivamente. Portanto, essas transições devem ser excluídas no passo 5 e são criados os novos estados  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle$ ,  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle$  e  $\langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle$  no passo 6, os quais são adicionados ao autômato  $G_{s_1}$  no passo 7. Novas transições  $0_{new} \xrightarrow{\epsilon} \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle$ ,  $0_{new} \xrightarrow{\epsilon} \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{\epsilon} \langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle$  são criadas no passo 8. Em seguida, são criadas as transições  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle \xrightarrow{A} \langle 0, A \rangle$ ,  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle \xrightarrow{B} \langle 0, B \rangle$  e  $\langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle \xrightarrow{B} \langle 0, B \rangle$  (passo 9). Além disso, é necessário criar estados intermediários e transições com eventos de falhas a partir dos estados que foram adicionados no passo 7. Essa etapa é necessária, pois os estados de destino das transições  $0_{new} \xrightarrow{\epsilon} \langle 0, A \rangle$ ,  $0_{new} \xrightarrow{\epsilon} \langle 0, B \rangle$  e  $\langle 0, A \rangle \xrightarrow{\epsilon} \langle 0, B \rangle$  possuem o evento de falha  $q$  ativo ( $q \in \Gamma_{db_1}(\langle 0, A \rangle)$  e  $q \in \Gamma_{db_1}(\langle 0, B \rangle)$ ), além disso, o mapeamento desses estados é diferente do mapeamento do estado de destino da transição de falha: ( $h(1) \neq h(\langle 0, A \rangle)$ ) e ( $h(1) \neq h(\langle 0, B \rangle)$ ). São criados os estados  $\langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle, q, 1 \rangle$ ,  $\langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle$  e  $\langle \langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle$  no passo 13 que são adicionados ao  $G_{s_1}$  no passo 14. Também são criadas as transições  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle \xrightarrow{q} \langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle, q, 1 \rangle$ ,  $\langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle \xrightarrow{q} \langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle$  e  $\langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle \xrightarrow{q} \langle \langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle$  no passo 15 e as transições  $\langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, A \rangle \rangle, q, 1 \rangle \xrightarrow{B} 1$ ,  $\langle \langle 0_{new}, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle \xrightarrow{B} 1$  e  $\langle \langle \langle 0, A \rangle, \epsilon, \langle 0, B \rangle \rangle, q, 1 \rangle \xrightarrow{B} 1$  no passo 16. O autômato  $G_{s_1}$  parcial, construído

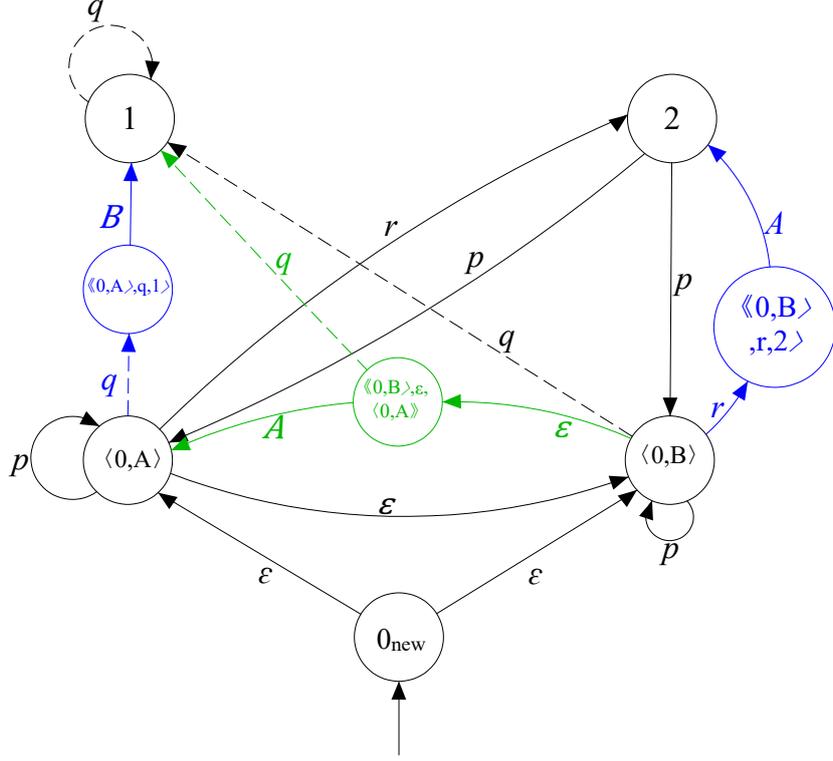


Figura 3.10: Autômato  $G_{s_1}$  parcial após alterações dos itens 2 (em azul) e 3 (em verde).

até o passo 24, está ilustrado na figura 3.11 com as alterações realizadas no item 2 destacadas em azul, no item 3 em verde e no item 4 em laranja.

Após o passo 24, em que é calculado  $G_{s_1} = \text{Obs}(G_{s_j}, \Sigma_{ab_j} \setminus \{\varepsilon\})$ , o autômato  $G_{s_1}$  é finalizado e está apresentado na figura 3.12. Os estados do autômato  $G$  foram renomeados para melhor visualização e o autômato resultante está apresentado na figura 3.13.

Como há apenas o Sensor 1 neste exemplo, o MS-IEL retorna apenas o autômato  $G_{s_1}$  como saída e, nesse caso o autômato que modela o comportamento completo do sistema é  $G = G_{s_1} \parallel \tilde{G}$ , ilustrado na figura 3.14. Note que no autômato  $G$  as informações fornecidas pelo Sensor 1 não estão acopladas aos eventos dos componentes do autômato  $\tilde{G}$  da figura 3.4, diferentemente do que acontece no resultado da aplicação do MS, em que há o acoplamento entre os eventos dos componentes ativos e as leituras dos sensores, como pode ser observado na figura 2.24. Note também que o estado inicial de  $G$  não está mapeado com nenhuma das possíveis saídas do Sensor 1, que é o conjunto  $Y_1 = \{A, B\}$ . Ao invés disso, esse estado inicial está mapeado com o valor genérico SL (Sem Leitura) devido à incerteza do sinal enviado pelo sensor nesse estado. Após a inicialização do sistema, o autômato  $G$  será capaz de identificar a informação enviada pelo Sensor 1, A ou B, e acompanhar a evolução dinâmica do sistema a partir da observação dos eventos do sistema modelado.



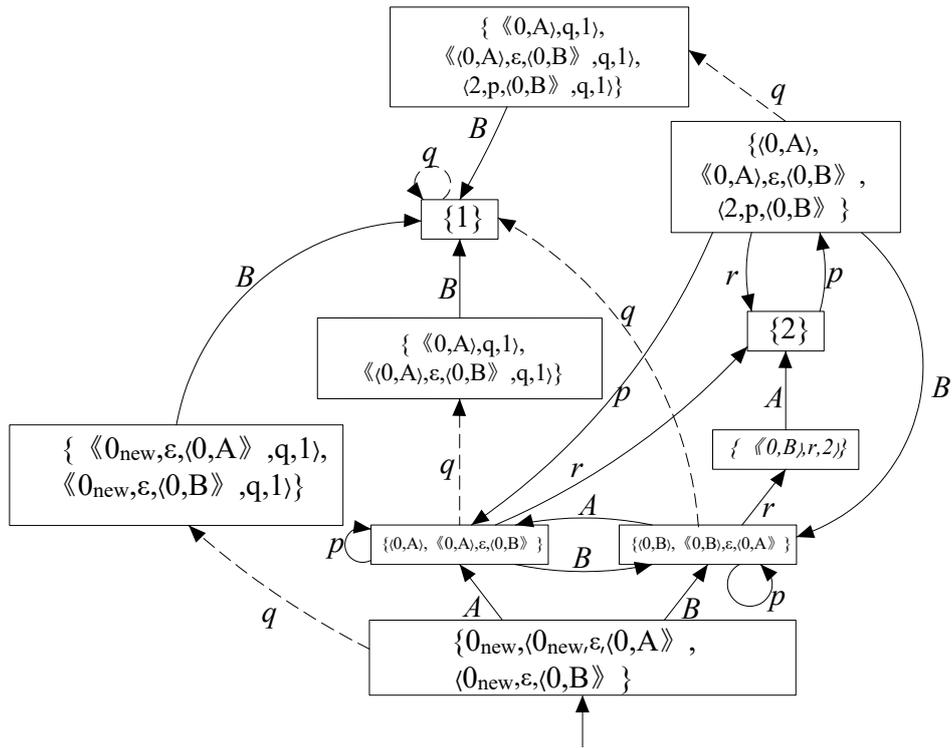


Figura 3.12: Autômato  $G_{s_1}$  final.

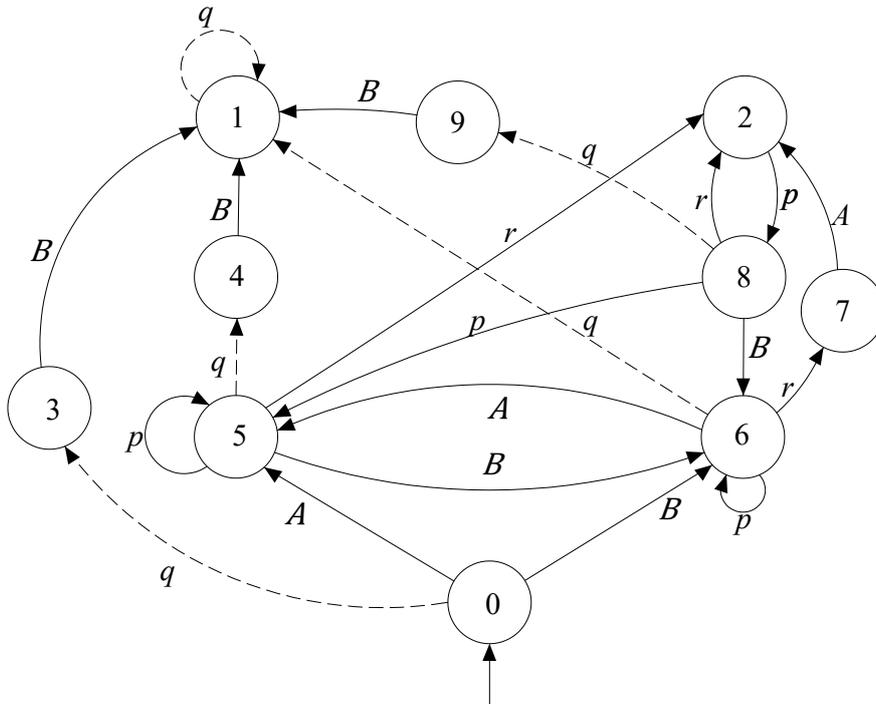


Figura 3.13: Autômato  $G_{s_1}$  final após renomeação dos estados.

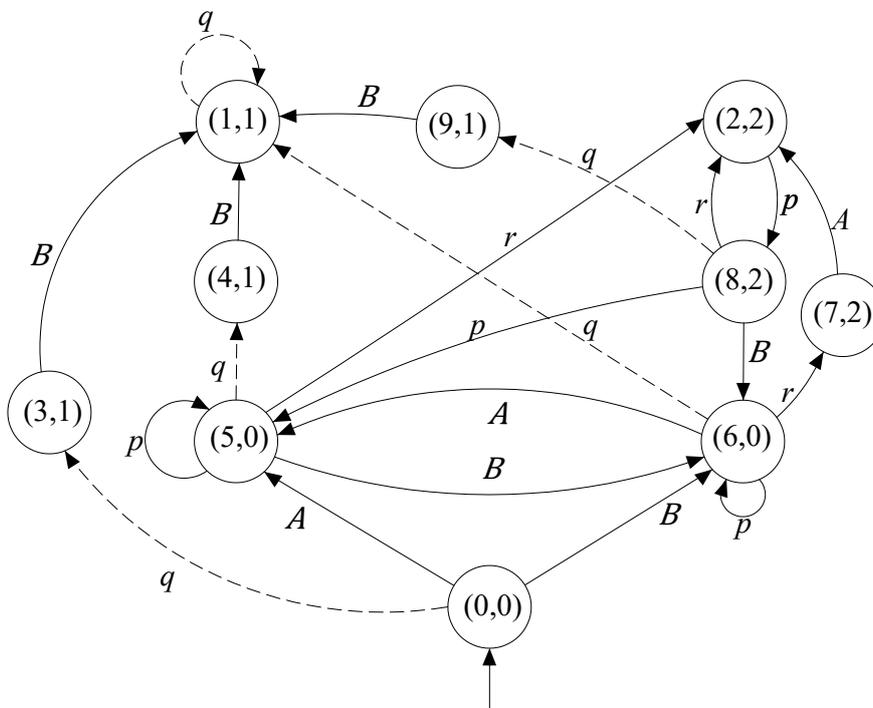


Figura 3.14: Autômato  $G = G_{s_1} || \tilde{G}$  do exemplo 3.3.

A proposição 3.2 nos mostra que as modificações realizadas pelo MS-IEL não alteram o comportamento modelado pelo autômato  $\tilde{G}$ , e também evidencia que o MS-IEL, ao final da construção do  $G_{s_j}$ , insere em  $\tilde{G}$  os eventos dos sensores mapeados, considerando ambos os comportamentos, normal e de falha, de  $\tilde{G}$ .

### 3.4 Aplicação do MS-IEL a um Sistema de Aquecimento

Esta seção é destinada a aplicar o MS-IEL ao sistema de aquecimento que foi inicialmente descrito no exemplo 2.10 e depois retomado no exemplo 2.13. A aplicação do MS-IEL nesse sistema objetiva descrever os passos da aplicação do método e também apresentar comparações em relação ao resultado da aplicação do MS do exemplo 2.13. Os componentes ativos foram modelados pelos autômatos  $G_{\text{Bomba}}$ ,  $G_{\text{Controlador}}$ , figura 2.12, e  $G_{Vf}$ , ilustrado na figura 2.22. A composição paralela entre eles resulta no autômato  $\tilde{G}_{aqf}$  da figura 2.23 (mostrado novamente na figura 3.15) e no Mapa de Sensores que está descrito na tabela 2.5 (mostrada novamente na tabela 3.6), em que o sensor de pressão é o Sensor 1 e  $Y_1 = \{P, SP\}$ , e o sensor de vazão é o Sensor 2 e  $Y_2 = \{V, SV\}$ .

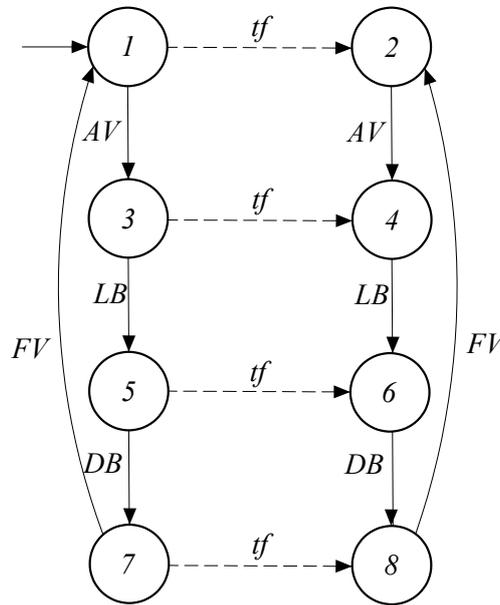


Figura 3.15: Autômato  $\tilde{G}_{aqf} = G_{\text{Bomba}} \parallel G_{\text{Controlador}} \parallel G_{Vf}$ .

Note que no Mapa de Sensores há somente um elemento de saída possível do conjunto  $Y_j$  para cada estado de  $\tilde{G}_{aq}$ , ou seja,  $|h_j(x_i)| = 1, \forall i, j$ . Como consequência, o algoritmo 3.1, do módulo de Desmembramento de Estados, não realizará nenhuma alteração por conta da condição do passo 5, logo  $G_{db_j}$  e  $MDS_{db_j}$  serão iguais a  $\tilde{G}_{aqf}$  e a  $MDS$ , respectivamente, para  $j = 1$  e  $j = 2$ .

Tabela 3.6: MDS para o autômato  $\tilde{G}_{aqf}$ .

Número do Estado	Nome do Estado	Sensor de Pressão	Sensor de Vazão
1	(BOFF,C1,VF)	SP	SV
2	(BOFF,C1,VTF)	SP	SV
3	(BOFF,C2,VA)	SP	SV
4	(BOFF,C2,VTF)	SP	SV
5	(BON,C3,VA)	P	V
6	(BON,C3,VTF)	P	SV
7	(BOFF,C4,VA)	SP	SV
8	(BOFF,C4,VTF)	SP	SV

Aplicando o algoritmo 3.2, módulo de Criação de Estados, para  $j = 1$ , o resultado é autômato  $G_{s_1}$  que modela o comportamento do sensor de pressão, ilustrado na figura 3.16 (a). O módulo de Criação de Estados inseriu nesse autômato seis novos estados e doze transições em consequência das mudanças de leituras do sensor de pressão identificadas no mapa da tabela 3.6 e a criação de transições de falha  $tf$ . As alterações realizadas pelo módulo de Criação de Estados para  $j = 1$  estão descritas a seguir.

1. Criação do estado  $\langle 3, LB, 5 \rangle$  e das transições  $3 \xrightarrow{LB} \langle 3, LB, 5 \rangle$  e  $\langle 3, LB, 5 \rangle \xrightarrow{P} 5$  pois  $h_1(3) = SP \neq h_1(5) = P$ , condição do passo 4. Como há uma transição de falha  $5 \xrightarrow{tf} 6$  e  $h_1(3) \neq h_1(6)$ , condições dos passos 11 e 12, respectivamente, deve-se adicionar o estado  $\langle \langle 3, LB, 5 \rangle, tf, 6 \rangle$  e as transições  $\langle 3, LB, 5 \rangle \xrightarrow{tf} \langle \langle 3, LB, 5 \rangle, tf, 6 \rangle$  e  $\langle \langle 3, LB, 5 \rangle, tf, 6 \rangle \xrightarrow{P} 6$ ;
2. Criação do estado  $\langle 4, LB, 6 \rangle$  e das transições  $4 \xrightarrow{LB} \langle 4, LB, 6 \rangle$  e  $\langle 4, LB, 6 \rangle \xrightarrow{P} 6$  pois  $h_1(4) = SP \neq h_1(6) = P$ , condição do passo 4;
3. Criação do estado  $\langle 5, DB, 7 \rangle$  e das transições  $5 \xrightarrow{DB} \langle 5, DB, 7 \rangle$  e  $\langle 5, DB, 7 \rangle \xrightarrow{SP} 7$  pois  $h_1(5) = P \neq h_1(7) = SP$ , condição do passo 4. Como há uma transição de falha  $7 \xrightarrow{tf} 8 \in \tilde{G}_{aqf}$  e  $h_1(5) \neq h_1(8)$ , condições dos passos 11 e 12, respectivamente, deve-se adicionar o estado  $\langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle$  e as transições  $\langle 5, DB, 7 \rangle \xrightarrow{tf} \langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle$  e  $\langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle \xrightarrow{SP} 8$ ; e
4. Criação do estado  $\langle 6, DB, 8 \rangle$  e das transições  $6 \xrightarrow{DB} \langle 6, DB, 8 \rangle$  e  $\langle 6, DB, 8 \rangle \xrightarrow{SP} 8$  pois  $h_1(6) = P \neq h_1(8) = SP$ , condição do passo 4.

Uma importante consequência da aplicação do MS-IEL é possibilidade de se analisar a contribuição de cada sensor para a diagnosticabilidade de determinada falha. Por exemplo, no autômato  $G_{s_1}$  é possível observar que existe uma sequência normal,  $s_n = (AV, LB, P, DB, SP, FV)$ , e uma sequência de falha,  $s_f = (tf, AV, LB, P, DB, SP, FV)$ , que possuem a mesma projeção sobre  $\Sigma_{o,s_1}^*$ ,

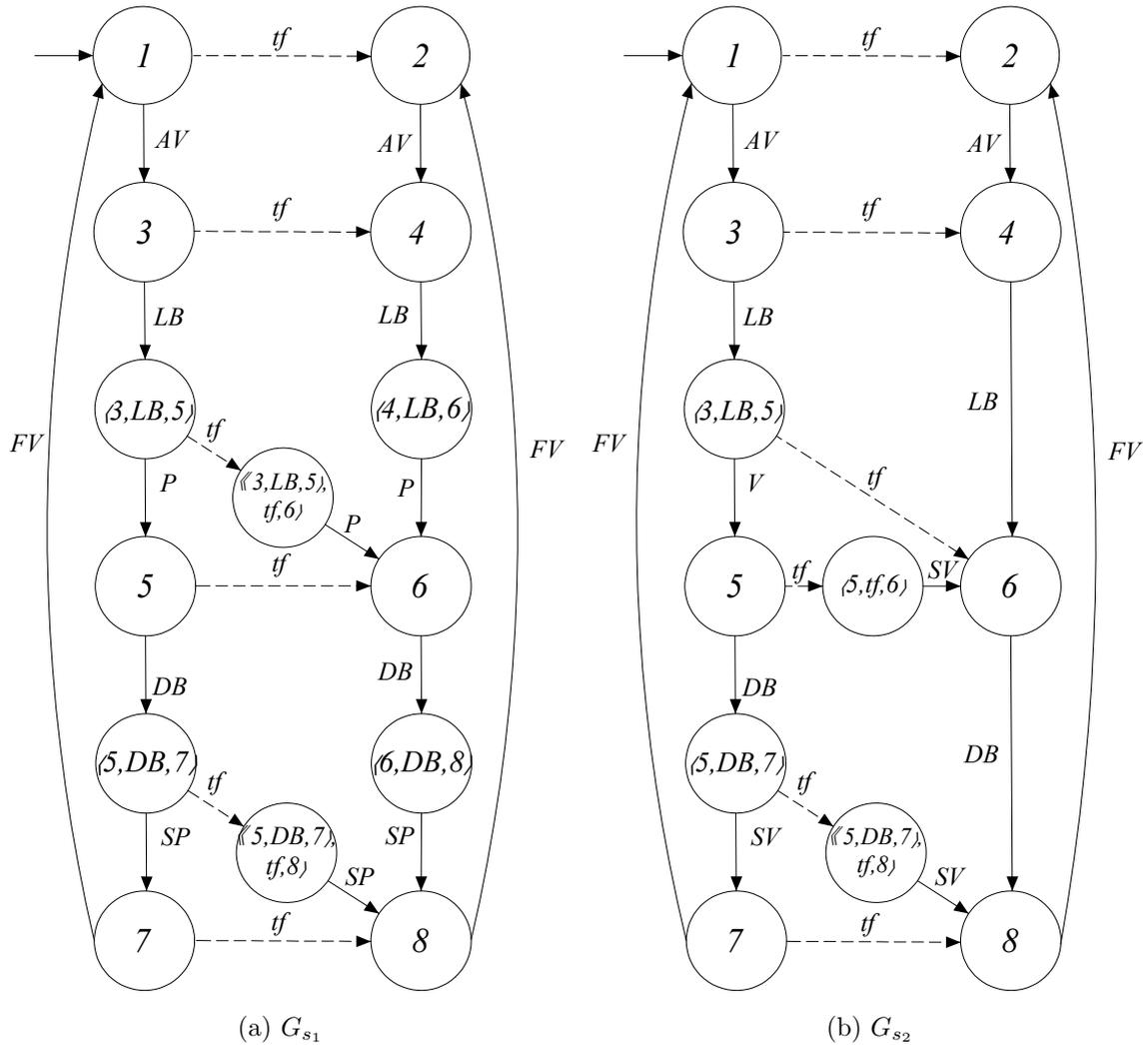


Figura 3.16: Autômatos que modelam o comportamento dos sensores.

ou seja,  $P_o(s_n) = P_o(s_f) = (AV, LB, P, DB, SP, FV)$ , evidenciando que o sensor de pressão não contribui para a diagnosticabilidade da falha  $tf$ . A análise da diagnosticabilidade completa do autômato  $G_{s_1}$  pode ser realizada ao aplicar o diagnosticador de teste  $G_{scc}$  da seção 2.7.2.

Vamos, agora, aplicar o módulo de Criação de Estados do MS-IEL para  $j = 2$ . O resultado é o autômato  $G_{s_2}$ , que modela o comportamento do sensor de vazão e está ilustrado na figura 3.16 (b). O módulo de Criação de Estados inseriu nesse autômato quatro estados e nove transições por conta das mudanças de leituras do sensor de vazão identificadas no mapa da tabela 3.6 e a criação de transições de falha. As alterações estão descritas a seguir.

1. Criação do estado  $\langle 3, LB, 5 \rangle$  e das transições  $3 \xrightarrow{LB} \langle 3, LB, 5 \rangle$  e  $\langle 3, LB, 5 \rangle \xrightarrow{V} 5$  pois  $h_2(3) = SV \neq h_2(5) = V$ , condição do passo 4. Como há uma transição de falha  $5 \xrightarrow{tf} 6$  e  $h_2(3) = h_2(6)$ , condições dos passos 11 e 18, respectivamente, deve-se realizar transição  $\langle 3, LB, 5 \rangle \xrightarrow{tf} 6$ ;

2. Criação do estado  $\langle 5, tf, 6 \rangle$  e das transições  $5 \xrightarrow{tf} \langle 5, tf, 6 \rangle$  e  $\langle 5, tf, 6 \rangle \xrightarrow{SV} 6$  pois  $h_2(5) = V \neq h_2(6) = SV$ , condição do passo 4; e
3. Criação do estado  $\langle 5, DB, 7 \rangle$  e das transições  $5 \xrightarrow{DB} \langle 5, DB, 7 \rangle$  e  $\langle 5, DB, 7 \rangle \xrightarrow{SV} 7$  pois  $h_2(5) = V \neq h_2(7) = SV$ , condição do passo 4. Como há uma transição de falha  $7 \xrightarrow{tf} 8$  e  $h_2(5) \neq h_2(8)$ , condição do passo 11 e do passo 12, respectivamente, deve-se adicionar o estado  $\langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle$  e as transições  $\langle 5, DB, 7 \rangle \xrightarrow{tf} \langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle$  e  $\langle \langle 5, DB, 7 \rangle, tf, 8 \rangle \xrightarrow{SV} 8$ .

Observando-se o autômato  $G_{s_2}$ , nota-se que a sequência normal,  $s_n = (AV, LB, V, DB, SV, FV)$ , e a sequência após o evento de falha  $s_f = (tf, AV, LB, DB, FV)$ , possuem projeções diferentes,  $P_o(s_n) = (AV, LB, V, DB, SV, FV)$  e  $P_o(s_f) = (AV, LB, DB, FV)$ , o que evidencia que o sensor de vazão pode contribuir para a diagnosticabilidade da falha  $tf$ . Na análise completa da diagnosticabilidade do  $G_{s_2}$ , aplicando o diagnosticador de teste  $G_{scc}$  da seção 2.7.2, é possível observar que não existem componentes fortemente conexos não triviais formadas por estados incertos e de falha e, portanto, a  $L(G_{s_2})$  é diagnosticável em relação a  $P_o$  e a falha  $tf$ .

O autômato  $G$ , resultado da composição paralela  $G = \tilde{G}_{aqf} || G_{s_1} || G_{s_2}$ , está representado na figura 3.17. Ele teve os estados renomeados para facilitar a sua visualização. Note que o autômato  $G_{aqf}$  resultado da aplicação do MS, ilustrado na figura 2.24, possui 9 estados e 13 transições enquanto que o autômato  $G$ , resultado da aplicação do MS-IEL possui 23 estados e 37 transições, porém o autômato  $G$  não possui as informações de comandos dos componentes ativos atreladas às informações dos sensores, como ocorre no autômato  $G_{aqf}$ . No caso do autômato  $G$ , as informações dos sensores são registradas por um único evento.

O autômato  $G_d = Obs(G || A_I)$  está ilustrado na figura 3.18. Note que nesse diagnosticador *online*, cada transição está associada a apenas um evento e o diagnóstico precipitado da falha  $tf$  que foi observado no autômato  $G_{d,aqf}$  da figura 2.25 não acontece, pois após a sequência  $s_1 = (AV, LB, P)$  o estado incerto  $\{(9N), (12Y)\}$  é alcançado e só avança para o estado certo de falha  $\{(18Y)\}$  caso, na sequência, aconteça o evento que representa o desligamento da bomba ( $DB$ ) antes do evento que representa a leitura de vazão ( $V$ ), o que indica, nesse caso, a ocorrência da falha na abertura da válvula, uma que vez que a bomba foi ligada e depois desligada sem o sensor de vazão enviar o sinal  $V$ .

Além de ser mais preciso quanto à estimação dos estados do sistema, o autômato  $G_d$  da figura 3.18, que foi construído como MS-IEL, também possui aplicação mais simples e prática ao sistema se comparado com o  $G_{d,aqf}$  da figura 2.25, que foi construído com o MS. Isso se dá por conta da característica construtiva que separa os eventos com ações de comando dos eventos que possuem leituras de sensores.

A diagnosticabilidade *offline* do autômato  $G$  pode ser verificada através do diagnosticador de teste  $G_{scc} = G_d || (G || A_l)$ , representado na figura 3.19. Esse diagnosticador não possui componentes fortemente conexos não triviais formados por estados de falha e incertos, logo a  $L(G)$  é diagnosticável em relação a  $P_o$  e a falha  $tf$ .

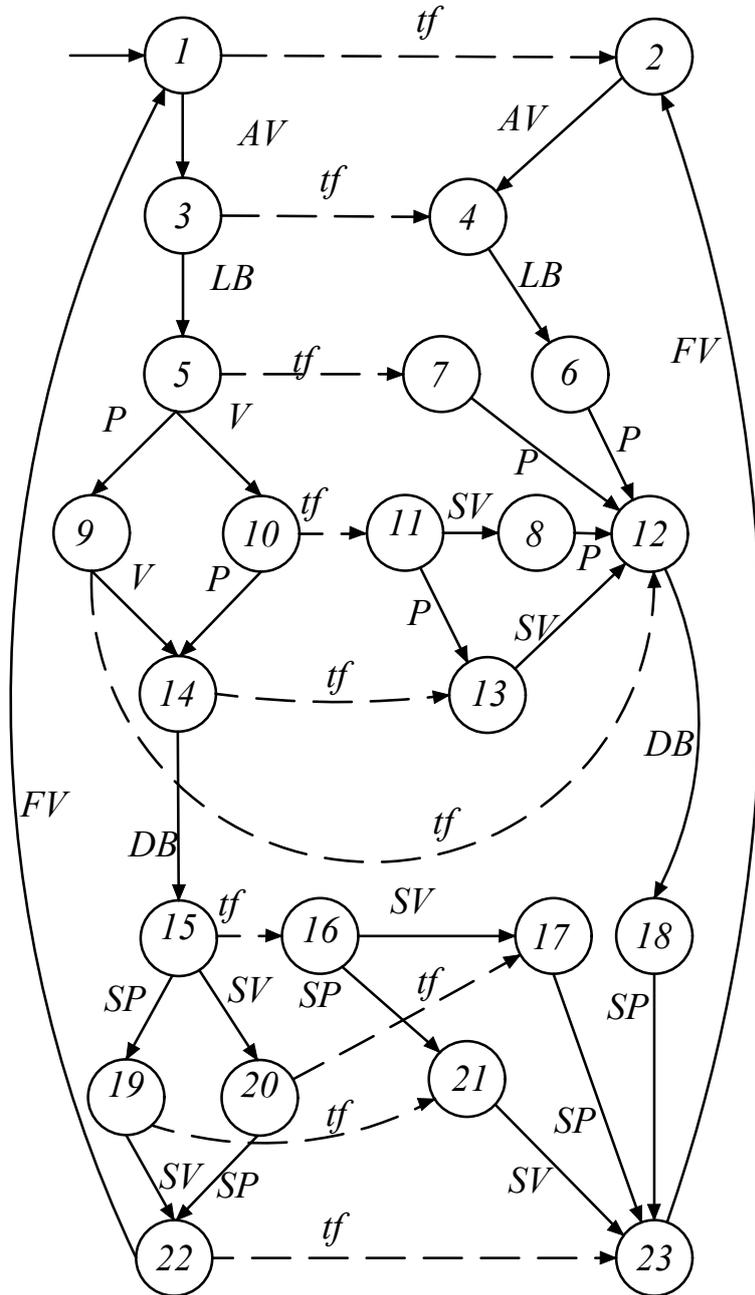


Figura 3.17: Autômato  $G$ .

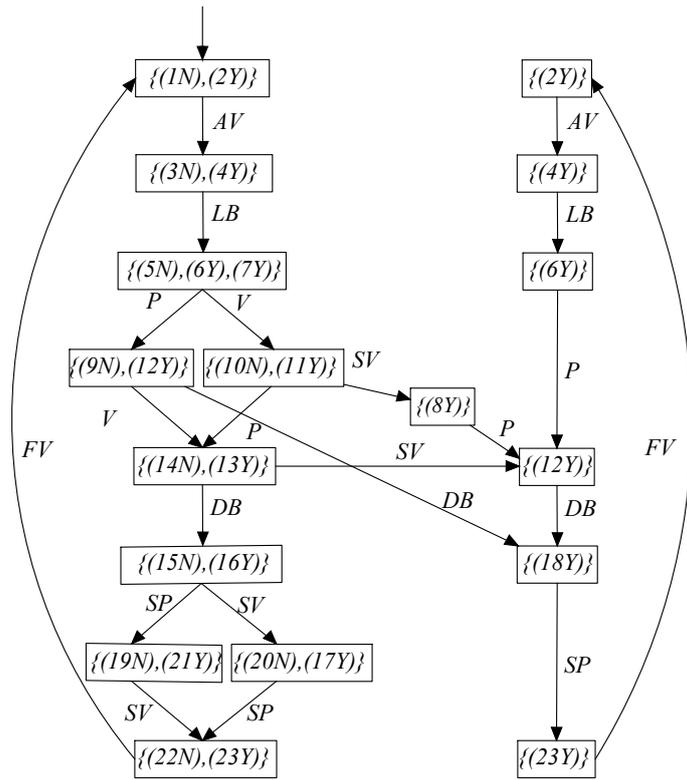


Figura 3.18: Autômato  $G_d$ .

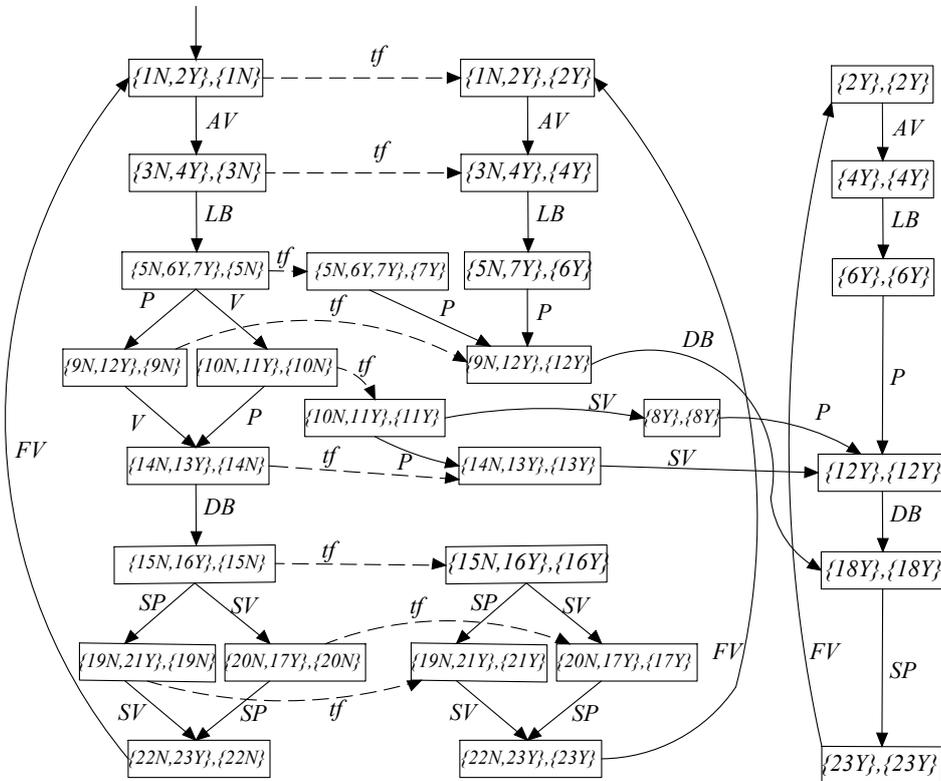


Figura 3.19: Autômato  $G_{scc}$ .

## 3.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o MS-IEL e mostrada a sua eficácia na construção dos autômatos que modelam o comportamento dos sensores. Foram descritos a sua arquitetura e os passos dos algoritmos que constituem o MS-IEL. Exemplos foram utilizados com o intuito de descrever a sua aplicação. Foi feita uma comparação entre os modelos de um sistema de aquecimento obtido a partir do MS e do MS-IEL. Nesse caso, notou-se que a aplicação do MS-IEL resulta em um modelo que facilita seu emprego em situações práticas e também evita o efeito do diagnóstico precipitado que foi observado no diagnosticador construído a partir da aplicação do MS para a modelagem do SED. Por fim, foi desenvolvida uma *toolbox* para o *DESLAB* [22] que implementa o MS-IEL, o seu código fonte encontra-se no repositório eletrônico [23].

# Capítulo 4

## Aplicação do MS-IEL para a Diagnose de Falhas de uma Unidade de Separação Trifásica

Neste capítulo será apresentado o processo de uma Unidade de Separação Trifásica (UST) instalada na plataforma de produção da PETROBRAS, localizada no campo de Marlim na Bacia de Campos. Um modelo a tempo contínuo dessa planta será utilizado para simulação, sendo os dados coletados utilizados para obter o seu modelo a eventos discretos por meio de autômatos e da aplicação do MS-IEL. Em seguida, a partir do modelo do processo serão obtidos os diagnosticadores.

Na seção 4.1 é descrito o processo da UST e são apresentados os equipamentos que a constituem. Na seção 4.2 são apresentadas as equações e o comportamento dinâmico do processo. O projeto do modelo a eventos discretos e a construção dos diagnosticadores com a utilização do MS-IEL é realizado na seção 4.3. Por fim, as simulações para validar os diagnosticadores projetados e os correspondentes resultados obtidos são apresentados na seção 4.4

### 4.1 Unidade de Separação Trifásica

No processo de extração de petróleo nas plataformas *offshore*, fluidos como a água e o gás são normalmente injetados no poço para aumentar a pressão interna e elevar o óleo até uma unidade de processamento primário de fluidos. Um processo de separação das três fases está esquematicamente representado na figura 4.1. Após a separação, o gás é comprimido e enviado ao gasoduto, o óleo é bombeado para um navio ou enviado ao oleoduto, enquanto que a água é re-injetada no poço ou descartada.

A UST em foco é constituída por um vaso separador, ou simplesmente separador,

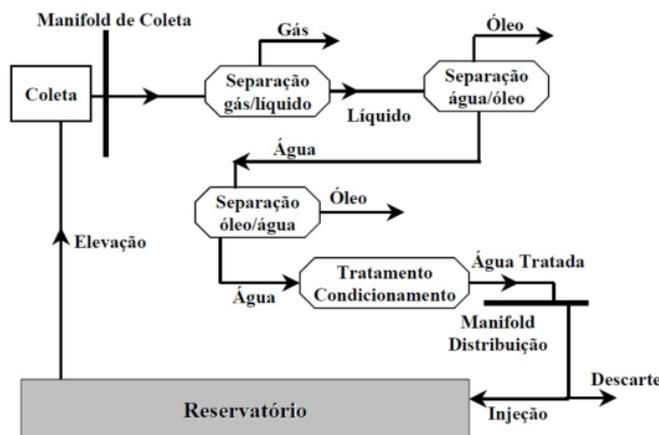


Figura 4.1: Esquema simplificado do processamento primário de fluidos.

em série com três hidrociclones, conforme ilustração da figura 4.2. O separador é responsável por: (i) separar o gás da mistura água-óleo-gás; e (ii) absorver as flutuações na vazão de entrada, consequência do fluxo de golfadas que acontece nos escoamentos multifásicos. Em seguida, a mistura líquida separada do gás passa por uma bateria de hidrociclones. Cada hidrociclone da sequência tem a função de remover o óleo residual da fase aquosa obtida do separador. Inicialmente é utilizado um hidrociclone do tipo BOWC (Bulk Oil-Water Cyclone), que diminui os teores de óleo de uma corrente de até 50% para no máximo 15%. O fluido passa então por um outro hidrociclone do tipo PDC (Pre De-oiler Cyclone), que trata correntes com teor de óleo de no máximo de 15% para sair com teores da ordem de 1500ppm. Essa corrente passa pelo hidrociclone DC (*Deoiler Cyclone*) para se obter uma saída de água com teor da ordem de 200ppm de óleo [24]. Essa tecnologia de hidrociclones instalados em sequência é uma evolução no tratamento de águas oleosas de poços petrolíferos que foi introduzida pela empresa norueguesa *Kvaerner* e permite reduzir o tamanho das plataformas de exploração de petróleo.

Por conta da importância das UST no processo de produção de petróleo, medidas de segurança devem ser tomadas a fim de evitar acidentes e redução da qualidade da produção que são provocadas, principalmente, por falhas não observáveis. Com esse objetivo são consideradas nesta dissertação as falhas permanentes nas válvulas  $S_o(t)$ ,  $S_g(t)$ ,  $S_{o_3}(t)$  e  $S_{w_3}(t)$ , constituintes do separador trifásico ilustrado na figura 4.2, supondo que fiquem travada-aberta ou travada-fechada.

Foram desenvolvidos dois macro modelos, um que contempla o comportamento dinâmico das variáveis contínuas do processo de separação, que será apresentado na seção 4.2, e outro modelo com o projeto do diagnosticador de falhas, que será descrito na seção 4.3.

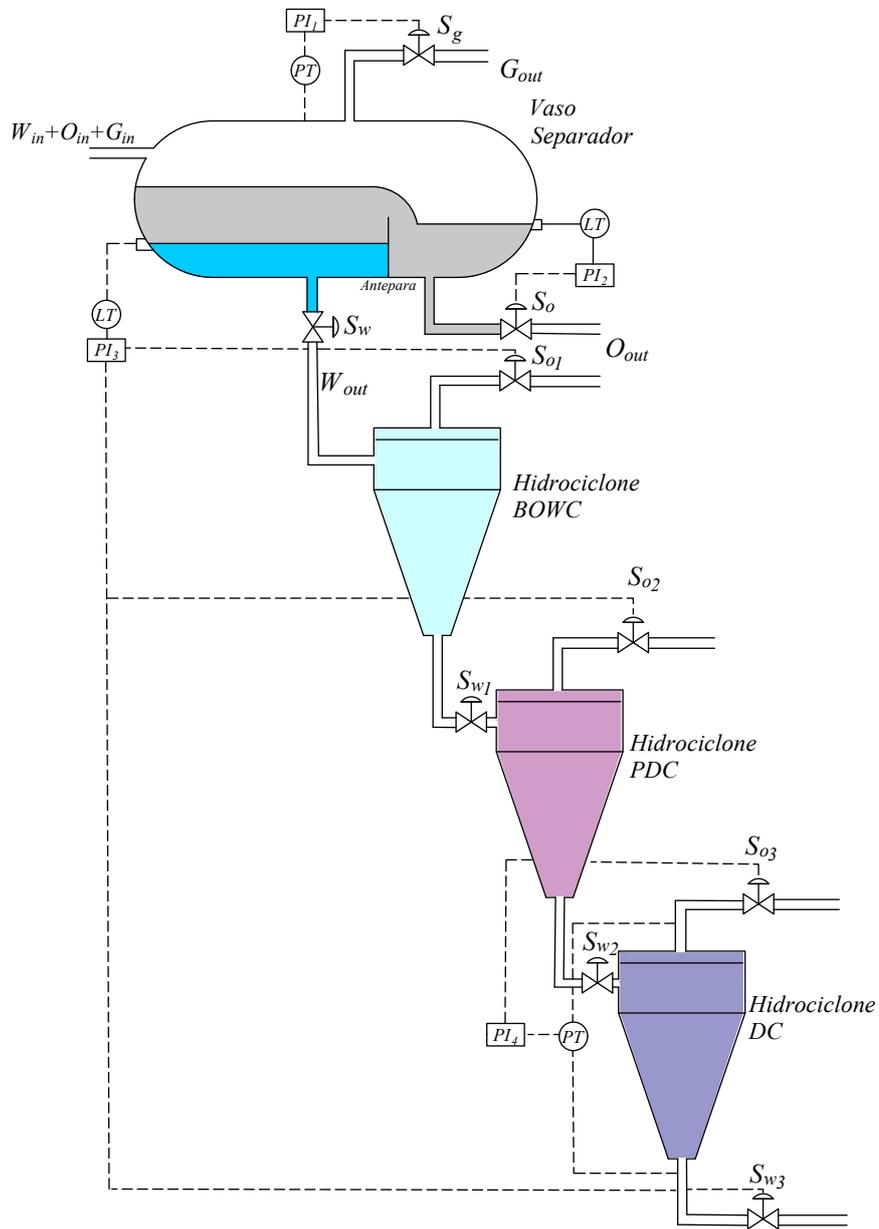


Figura 4.2: Unidade de Separação Trifásica.

## 4.2 Modelos Dinâmicos de Variáveis Contínuas da Unidade de Separação Trifásica

A modelagem matemática dinâmica da UST utilizada nesta dissertação foi realizada por [14, 24] e adaptada por [17, 25], tendo sido baseada nos dados de uma planta real de uma plataforma de produção da PETROBRAS, localizada no campo de Marlim na Bacia de Campos. A modelagem contempla o equacionamento do vaso separador e do hidrociclone separadamente, sendo depois realizada a sua integração. Já os controles propostos por [17, 25, 26] foram usados para a modelagem e simulação do modelo integrado do processo contínuo.

O vaso separador, figura 4.3, tem um formato cilíndrico horizontal e é projetado para operar em altas temperaturas, cerca de  $90^{\circ}\text{C}$ , e pressões, em torno de  $10\text{kgf/cm}^2$ . O separador é composto pela Câmara de Separação (CS) e pela Câmara de Óleo (CO), que são separadas por uma antepara. O modelo do separador possui sete variáveis de estados: (i)  $h_t(t)$ , nível total da mistura na câmara de separação; (ii)  $h_o(t)$ , nível do óleo na câmara de óleo; (iii)  $h_w(t)$ , nível da água na câmara de separação; (iv)  $p(t)$ , pressão de gás no separador; (v)  $V_{wsc}(t)$ , volume de água na fase oleosa na câmara de separação; (vi)  $V_{osc}(t)$ , volume de óleo na fase aquosa na câmara de separação; e (vii)  $V_{voc}(t)$ , volume de água na fase oleosa na câmara de óleo. O equacionamento que modela o comportamento dinâmico do separador, juntamente com as variáveis e os parâmetros são descritos no Apêndice A.

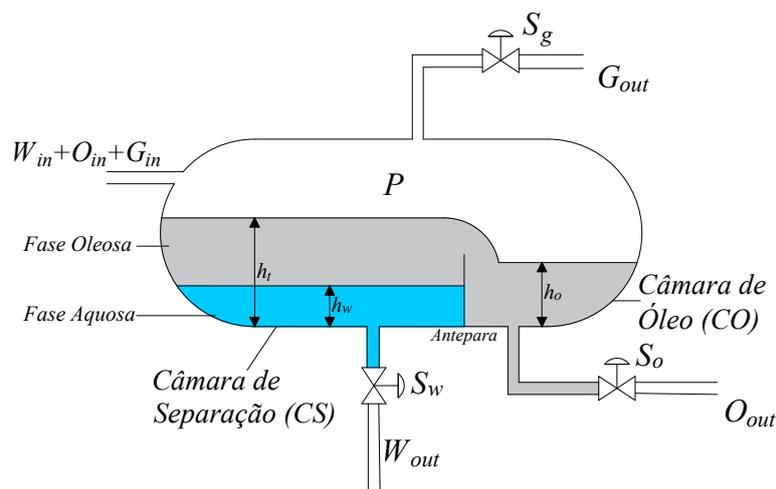


Figura 4.3: Estrutura interna do vaso separador.

Os hidrociclones, figura 4.4, são importantes no processo de separação pois a mistura água-óleo que sai da câmara de separação não pode ser despejada diretamente no oceano, uma vez que ela contém resíduos de óleo acima de 50% do

volume total. Assim, além de ser uma ameaça ao meio ambiente, essa quantidade considerável de óleo justifica um tratamento para separá-lo da água e adicioná-lo de volta ao sistema de produção de óleo. O equacionamento do fluxo do hidrociclone, as suas variáveis e parâmetros estão apresentados no Apêndice B.

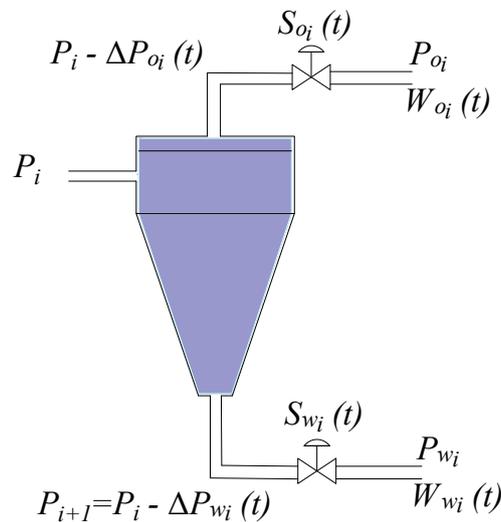


Figura 4.4: Modelo do *i*-ésimo hidrociclone.

A integração entre os modelos do vaso separador e dos hidrociclones, as condições iniciais e os valores de *setpoint* são descritos no Apêndice C.

A UST é composta por quatro controladores proporcional-integral (*PI*) : (i)  $PI_1$ , (ii)  $PI_2$ , (iii)  $PI_3$  e (iv)  $PI_4$ , mostrados na figura 4.2. O controlador  $PI_1$  controla a pressão interna do vaso separador atuando sobre a válvula de gás  $S_g(t)$ . O controlador  $PI_2$  controla o nível de óleo na câmara de óleo cuja variável medida é o nível de óleo e a ação de controle é realizada através da manipulação da válvula de saída óleo  $S_o(t)$ . O controlador  $PI_3$  controla o nível de água na câmara de separação, manipulando as válvulas de saída de óleo dos hidrociclones BOWC e PDC ,  $S_{o1}$  e  $S_{o2}$ , respectivamente, e a válvula de saída de água  $S_{w3}$  do hidrociclone DC de acordo a medição do nível de água na câmara de separação. Por fim, o controlador  $PI_4$  controla a pressão dentro do hidrociclone DC, atuando na válvula de saída de óleo  $S_{o3}$  de acordo com a pressão diferencial. A estrutura dos controladores *PI* e os seus parâmetros estão descritos no Apêndice D.

### 4.2.1 Comportamento Integrado do Processo

Para as simulações da UST, foi adaptado o modelo implementado em *simulink*® por [27]. Essas simulações foram importantes para: (i) validar a implementação das equações através do comportamento esperado para o sistema; e (ii) obter características do comportamento integrado das variáveis do processo como subsídio para a modelagem por modelos discretos aplicando o MS-IEL.

Foram consideradas, inicialmente, variações nos *setpoints* de acordo com a tabela 4.1. O comportamento das variáveis controladas que representam o nível de óleo na câmara de óleo, o nível de água na câmara de separação, a pressão de gás no vaso separador e a pressão diferencial no hidrociclone DC em relação aos seus respectivos *setpoints* pode ser observado na figura 4.5. Note que o estado estacionário do sistema, para as condições iniciais da simulação, é alcançado em até 2000s. Os tempos de acomodações calculados para essas variáveis estão descritos na tabela 4.2. Já o desempenho dos comandos sobre as válvulas está ilustrado na figura 4.6, em que as variáveis denominadas como *cmdSo*, *cmdSw3*, *cmdSg* e *cmdSo3*, representam os comandos que são efetuados pelo controlador para as válvulas *So*, *Sw3*, *Sg* e *So3*, respectivamente. Note que em  $t = 3000s$ , quando o *setpoint* do nível de óleo  $h_{o,sp}$  passa a ser igual a  $0,4m$ , figura 4.5, a ação do controlador é abrir parcialmente a válvula *So*, figura 4.6, para reduzir  $h_o$  na câmara de óleo para o novo valor do *setpoint*. Em  $t = 5000s$ , quando o *setpoint* do nível da água  $h_{w,sp}$  passa a ser igual a  $0,6m$ , a ação do controlador é fechar parcialmente a válvula *Sw3* para elevar o nível  $h_w$  na câmara de separação, o que impacta também no aumento de  $h_o$  e da  $P_{dr}$ ; em consequência o controlador abre parcialmente as válvulas *So* e fecha parcialmente a válvula *So3*. Em  $t = 7000s$ , quando  $p_{sp} = 10,48kgf/cm^2$ , o controlador fecha parcialmente a válvula *Sg* para elevar a pressão do separador; em consequência, o nível  $h_o$  reduz e o controlador fecha parcialmente *So*. Por fim, em  $t = 9000s$  quando  $P_{dr,sp} = 1,5$ , a válvula *So3* é parcialmente aberta e nenhuma outra variável controlada é alterada. Em suma, observa-se que as variáveis  $h_o$ ,  $h_w$  e  $p$  reduzem quando as respectivos comandos *cmdSo*, *cmdSw3* e *cmdSg* atuam no sentido de abrir essas válvulas. Já a pressão  $P_{dr}$  reduz com o comando *cmdSo3* para fechar essa válvula.

Tabela 4.1: Variação no *setpoint*.

Parâmetro	Valor Inicial	Novo Valor	Instante da mudança
$h_{o,sp}$	0,4976 m	0,4 m	3000s
$h_{w,sp}$	0,4931 m	0,6 m	5000s
$p_{sp}$	9,4806 kgf/cm	10,48 kgf/cm	7000s
$P_{dr,sp}$	1,25	1,5	9000s

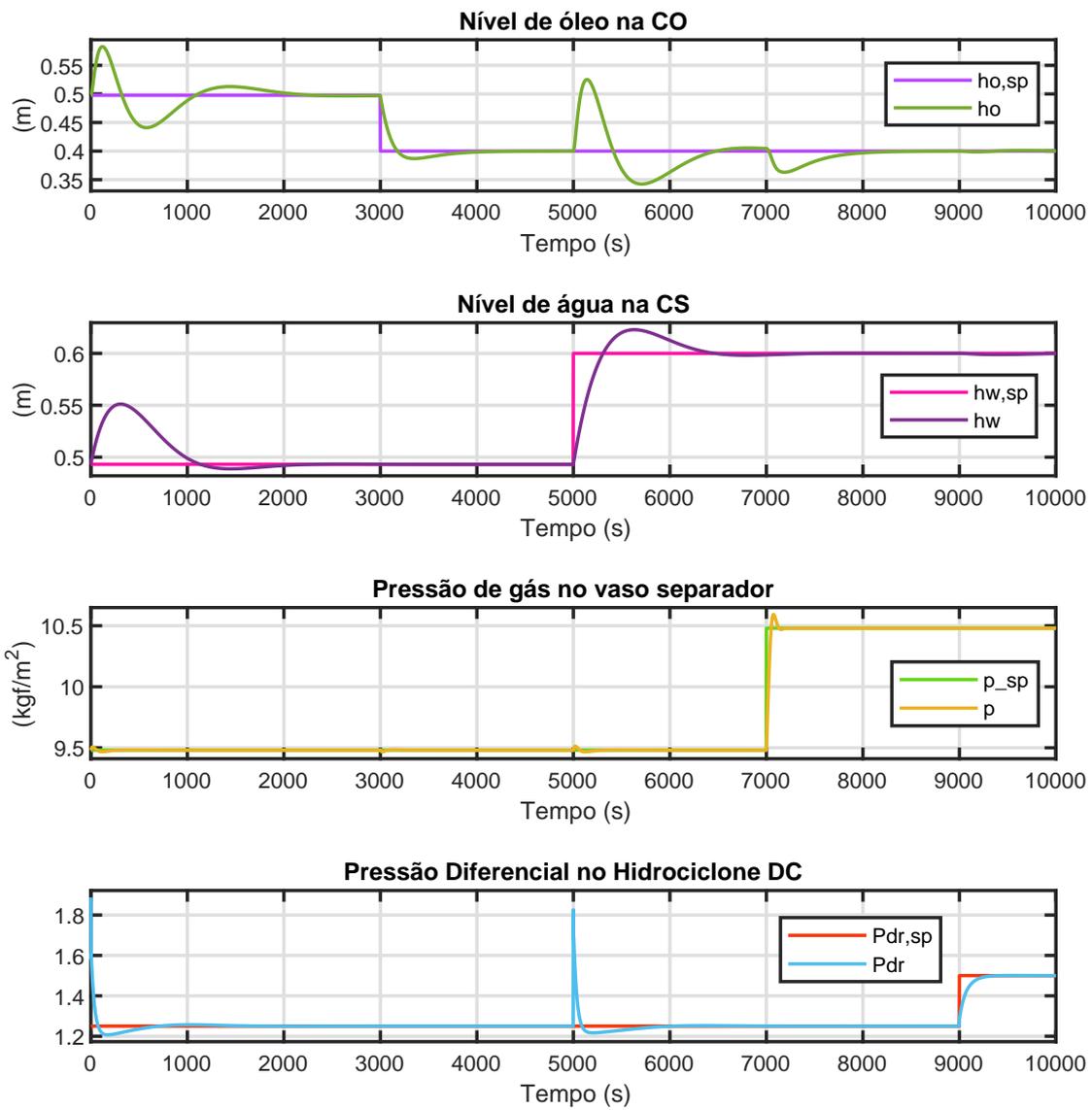


Figura 4.5: Respostas das variáveis controladas às alterações nos *setpoints*.

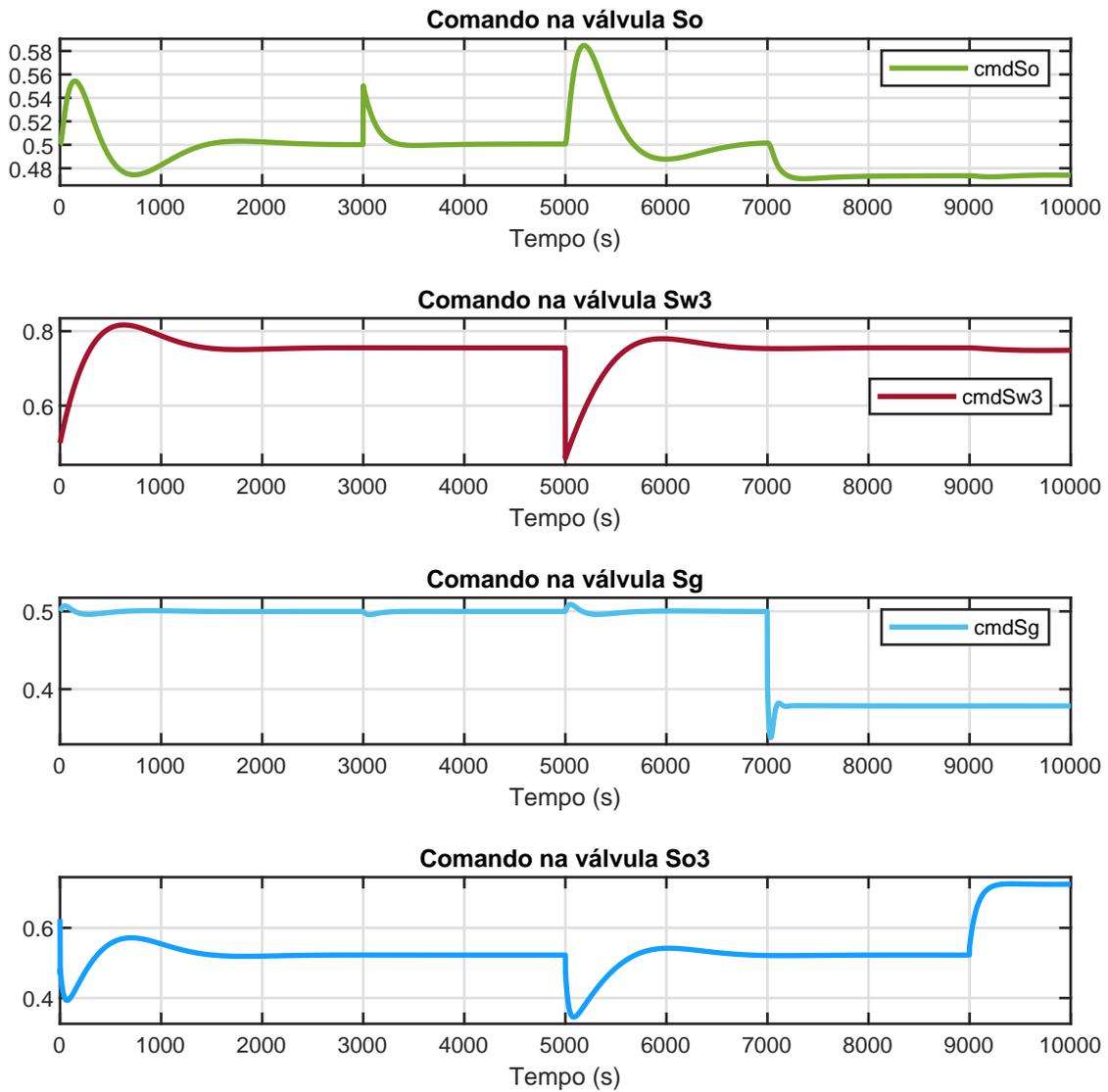


Figura 4.6: Respostas das variáveis manipuladas às alterações nos *setpoints*.

Tabela 4.2: Tempo de acomodação das variáveis.

Variável	Tempo de Acomodação
$h_o(t)$	146s
$h_w(t)$	1080s
$p(t)$	46s
$P_{dr}(t)$	136s

Outra análise do comportamento integrado da UST foi feita realizando alterações nas variáveis de entrada: (i) vazão de entrada de água  $W_{in}$ ; (ii) vazão de entrada de óleo  $O_{in}$ ; e (iii) vazão de entrada de gás  $G_{in}$ , conforme descrito na tabela 4.3. Os resultados das variáveis controladas e manipuladas às alterações na entrada do separador estão ilustradas nas figuras 4.7 e 4.8, respectivamente. Em  $t = 3000s$ , quando  $W_{in}$  aumenta 10%, os níveis  $h_w$  na câmara de separação e  $h_o$  na câmara de óleo se elevam, enquanto a pressão diferencial  $P_{dr}$  reduz levemente. A ação do controlador é abrir parcialmente as válvulas  $S_o$ ,  $S_{w_3}$  e  $S_{o_3}$ . Em  $t = 5000s$ , quando  $O_{in}$  aumenta 10% o nível  $h_o$  também se eleva praticamente na mesma proporção, saindo de  $0,5m$  para  $0,558m$ ; em consequência, a ação de controle abre parcialmente a válvula  $S_o$ . Por fim, em  $t = 7000s$ , quando  $G_{in}$  reduz 20%, a pressão no separador também diminui e a ação de controle fecha parcialmente a válvula  $S_g$ . Note que o controle é robusto para as variações que foram impostas, zerando o erro das variáveis controladas sem a necessidade de alcançar os limites extremos com as válvulas totalmente abertas ou totalmente fechadas.

Tabela 4.3: Variação nas variáveis de entrada.

Parâmetro	Porcentagem variada	Instante da mudança
$W_{in}$	aumento de 10%	3000s
$O_{in}$	aumento de 10%	5000s
$G_{in}$	redução de 20%	7000s

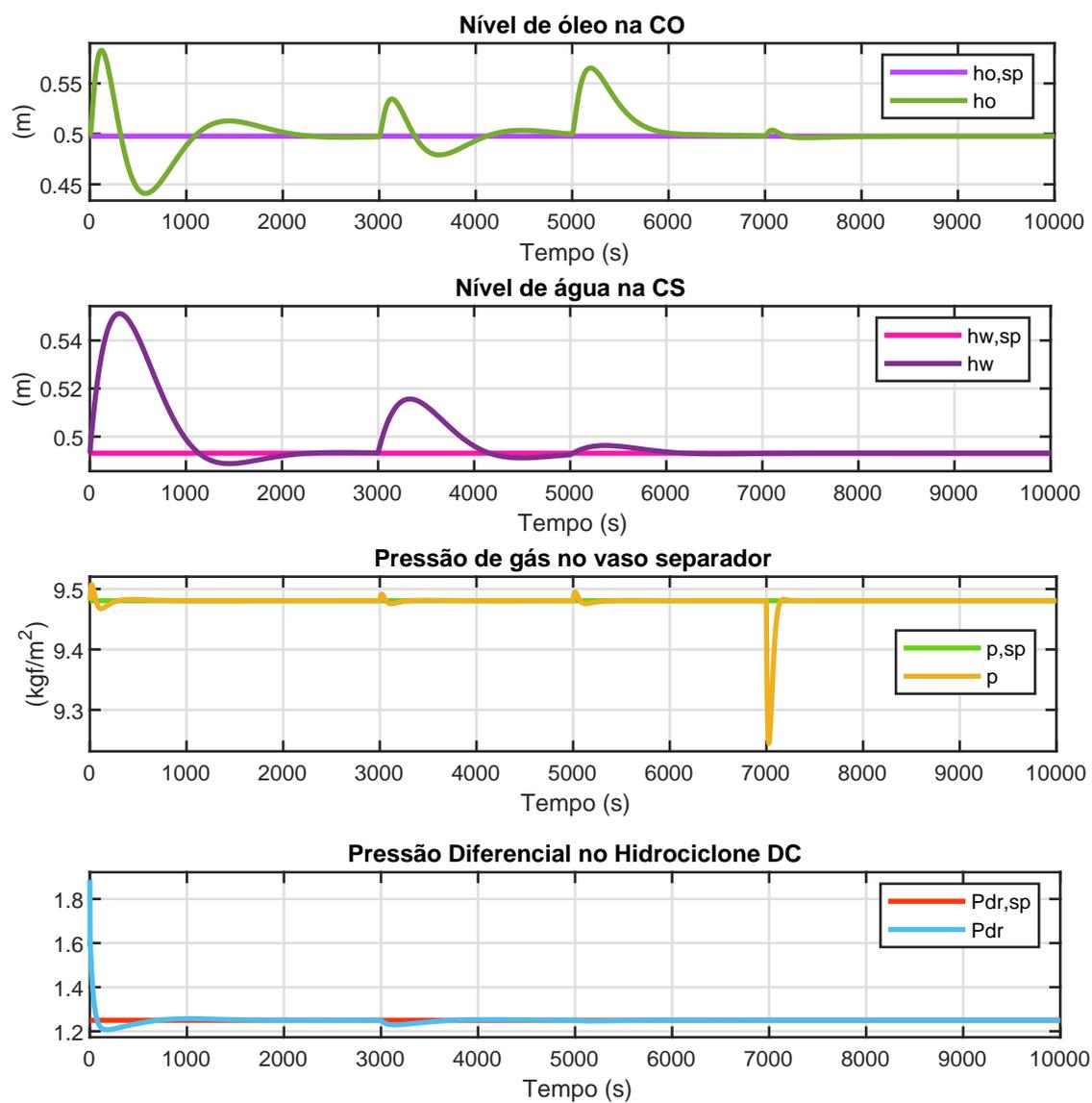


Figura 4.7: Respostas das variáveis controladas às alterações na entrada.

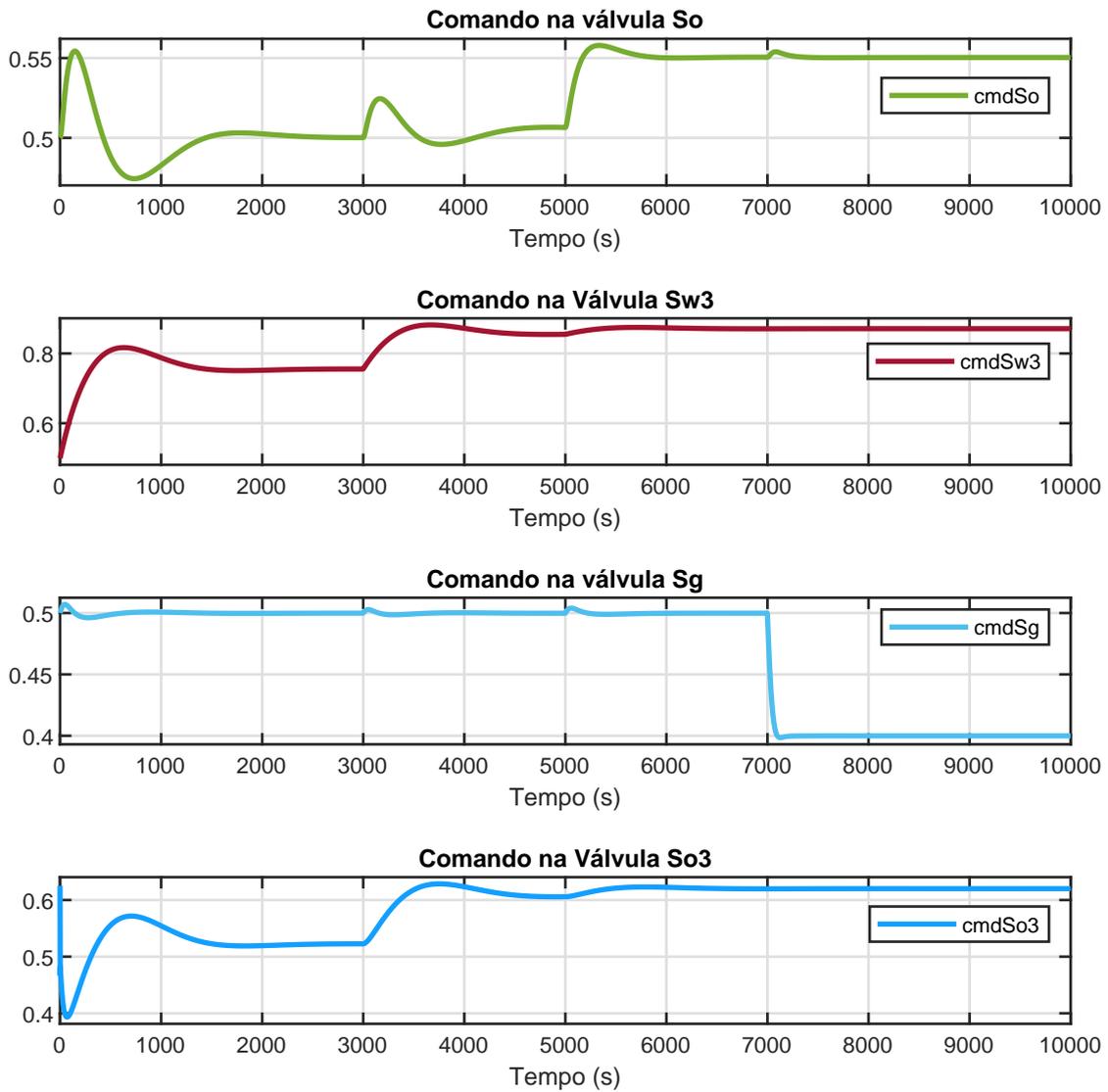


Figura 4.8: Respostas das variáveis manipuladas às alterações na entrada.

## 4.3 Modelo do Diagnosticador em SED para a Unidade de Separação Trifásica

Para o projeto do diagnosticador foram seguidos os seguintes passos: (i) identificar os componentes do sistema; (ii) determinar as falhas a serem diagnosticadas; (iii) selecionar os sensores que fornecerão informações sobre o processo; (iv) realizar a modelagem por eventos discretos dos componentes ativos; (v) aplicar o MS-IEL para obter o comportamento integrado com os sensores do modelo; (vi) analisar diagnosticabilidade *offline* do modelo; e (vii) aplicar o diagnosticador *online* ao processo e avaliar o seu desempenho.

Entre as diversas falhas que podem acontecer no processo de separação trifásica, o foco deste trabalho está voltado para a possibilidade de travamento das válvulas nas posições totalmente aberta e totalmente fechada. Os controladores do sistema atuam em seis válvulas e o diagnosticador será aplicado a quatro delas,  $S_o(t)$ ,  $S_{w_3}(t)$ ,  $S_g(t)$  e  $S_{o_3}(t)$ , que são responsáveis por quatro variáveis: o nível de óleo na câmara de óleo, o nível da água na câmara de separação, a pressão do gás no separador e a razão da pressão diferencial no hidrociclone DC, respectivamente.

Em cada uma das quatro malhas de controle do sistema dinâmico, exibidas na figura 4.2, será aplicado o diagnosticador *online*  $G_d$  conforme a estrutura da figura 4.9. O gerador de eventos é um componente fundamental para o diagnóstico de falhas por ser a interface entre o sistema dinâmico e o sistema a eventos discretos. Ele é capaz de observar os valores de *setpoint* das variáveis controladas, os comandos do controlador PI e as informações de pressão ou nível fornecidas pelo respectivo sensor e transformar esses dados em sinais de bordas de subida ou descida para serem interpretados como eventos pelo diagnosticador  $G_d$ . Os detalhes do projeto do gerador de eventos serão descritos na seção 4.3.4.

O diagnosticador *online*  $G_d$  tem a função de acompanhar o comportamento do sistema e sinalizar a ocorrência das falhas modeladas, sendo obtido a partir do autômato  $G$  que modela o comportamento da planta, como descrito na seção 2.7.2. Dessa forma, o foco do projeto do diagnosticador se volta para a construção do autômato  $G$  que, além de modelar o comportamento do sistema considerando a ocorrência das falhas, deve também gerar uma linguagem diagnosticável. O autômato  $G$  será construído utilizando o método MS-IEL, apresentado no capítulo 3, e seguirá os estágios mostrados na figura 4.10. O autômato  $G_v$  que modela o comportamento da válvula será descrito na seção 4.3.1, os detalhes da aplicação do MS-IEL, a obtenção dos autômatos de sensores e a construção do Mapa de Sensores serão mostrados na seção 4.3.2.

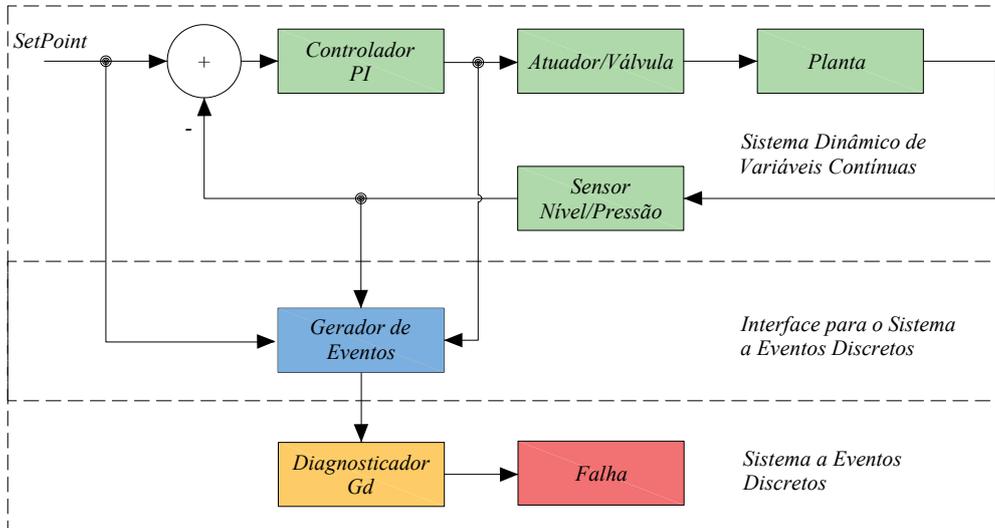


Figura 4.9: Arquitetura do diagnosticador implementado na UST.

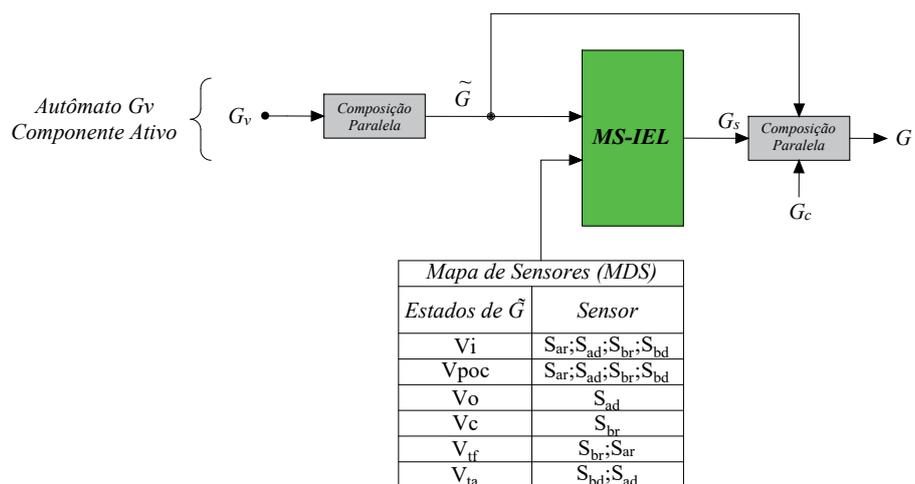


Figura 4.10: Modelagem do autômato  $G$  da UST.

Após a aplicação do MS-IEL e a obtenção dos autômatos de sensores, percebeu-se que a linguagem gerada por  $\tilde{G}||G_s$  possuía mais sequências de eventos do que as variáveis da UST poderiam produzir, além disso, o diagnosticador *offline*  $G_{scc}$  apresentava que haviam componentes fortemente conexos não triviais formados por estados incertos e certos, logo essa linguagem era não diagnosticável em relação a  $P_o$  e a  $\Sigma_f$ . Foi então proposto nesta dissertação a construção de mais um autômato, o  $G_c$  para ser integrado à modelagem do SED. O autômato  $G_c$  modela o controlador  $PI$ , ele foi construído de maneira que representasse a linguagem gerada pelos eventos de comando do controlador em resposta aos eventos dos sensores. A construção do autômato  $G_c$  é apresentada na seção 4.3.3.

### 4.3.1 Modelagem dos Componentes Ativos da UST: Válvulas

As válvulas  $S_o$ ,  $S_g$ ,  $S_{w_3}$ , e  $S_{o_3}$  possuem comportamentos idênticos, a nível de abstração de modelagem de SEDs. A modelagem de cada uma delas, contemplando o comportamento normal e o de falha, pode ser representada pelo autômato  $G_v$ , figura 4.11, cujos estados e eventos são descritos na tabela 4.4. Como não é possível determinar a posição da válvula ao iniciar o sistema, o autômato  $G_v$  começa com o estado inicial  $V_i$  no qual todos os eventos estão ativos. Note também que os eventos de falha, válvula travada-fechada ( $tf$ ) e válvula travada-aberta ( $ta$ ) estão ativos em todos os estados do autômato  $G_v$ .

Neste trabalho considerou-se que os eventos  $O_t$ ,  $C_t$  e  $P_{oc}$ , presentes no modelo da válvula, são observados a partir dos comandos do controlador  $PI$ , exceto os eventos de falha  $tf$  e  $ta$ , que não são observáveis.

Tabela 4.4: Estados e eventos do autômato  $G_v$  que modela o comportamento da válvula.

Estado	Descrição	Evento	Descrição
$V_i$	Estado inicial	$O_t$	Abrir totalmente
$V_c$	Válvula totalmente fechada	$C_t$	Fechar totalmente
$V_o$	Válvula totalmente aberta	$P_{oc}$	Abrir/Fechar parcialmente
$V_{poc}$	Válvula parcialmente aberta/fechada	$ta$	Travada aberta
$V_{tf}$	Válvula travada-fechada	$tf$	Travada fechada
$V_{ta}$	Válvula travada-aberta		

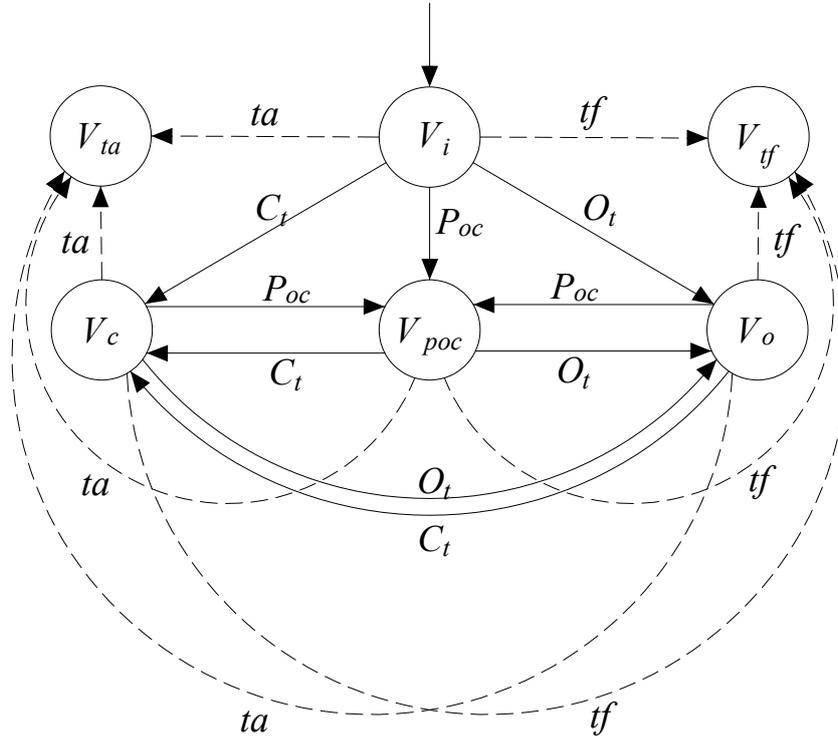


Figura 4.11: Autômato  $G_v$  que modela o comportamento da válvula. As descrições dos seus estados e eventos estão apresentadas na tabela 4.4.

### 4.3.2 Aplicação do MS-IEL na Unidade de Separação Trifásica

O MS-IEL, proposto nesta dissertação, deve ser aplicado ao autômato  $\tilde{G}$  juntamente com o MDS para inserir o comportamento dos sensores na modelagem dos componentes ativos do sistema a partir da composição paralela com os autômatos de sensores que são construídos. Na obtenção do modelo a eventos discretos da UST,  $\tilde{G}$  é o autômato que modela o comportamento da válvula  $G_v$ , ilustrado na figura 4.11, uma vez que  $G_v$  é o único elemento ativo presente no sistema e o seu comportamento não depende dos sinais enviados pelos sensores.

A primeira etapa para a aplicação do MS-IEL é a construção da tabela MDS. Essa tabela deve possuir, para cada estado do autômato  $\tilde{G}$ , as possíveis saídas dos sensores presentes no sistema. Nesta dissertação foi utilizado o conceito de sensores virtuais [7] para tratar os sinais lidos diretamente da planta. Os sensores virtuais são utilizados para aumentar as informações providas pelos sensores *reais* do sistema, a partir de soluções analíticas, como simplesmente, um comparador de limites ou, de maneira um pouco mais complexa, utilizando técnicas de processamento de sinais. A proposta dos sensores virtuais é proporcionar informações para a diagnose de falhas utilizando a quantidade mínima de sensores instalados e explorando as

informações já disponíveis pelos sinais coletados. No caso da UST, o sinal dos transdutores de nível são analógicos e transmitem o sinal correspondente ao nível instantâneo dos tanques. Para extração dessa informação, optou-se por tratar o sinal de nível/pressão, comparado-o com uma amostra sua atrasada para obter o sentido de variação da variável, isto é, se está aumentando ou reduzindo. Comparou-se também o sinal de nível/pressão com o seu valor de *setpoint* para obter a informação da variável acima ou abaixo do *setpoint*. Assim, os eventos do sensor virtual são: (i)  $S_{ar}$ , medição acima do *setpoint* e aumentando; (ii)  $S_{ad}$ , medição acima do *setpoint* e descendo; (iii)  $S_{br}$ , medição abaixo do *setpoint* e aumentando; e (iv)  $S_{bd}$ , medição abaixo do *setpoint* e descendo.

Tabela 4.5: MDS para o autômato  $\tilde{G}$  que modela o comportamento das válvulas  $S_o$ ,  $S_{w_3}$  e  $S_g$ .

Estados de $\tilde{G}$	Sensor Virtual
$V_i$	$S_{ar}; S_{ad}; S_{br}; S_{bd}$
$V_{poc}$	$S_{ar}; S_{ad}; S_{br}; S_{bd}$
$V_o$	$S_{ad}$
$V_c$	$S_{br}$
$V_{tf}$	$S_{br}; S_{ar}$
$V_{ta}$	$S_{bd}; S_{ad}$

O MDS preenchido com os eventos  $S_{ar}$ ,  $S_{ad}$ ,  $S_{br}$  e  $S_{bd}$  para o autômato  $\tilde{G}$  das válvulas  $S_o$ ,  $S_{w_3}$  e  $S_g$  está exibido na tabela 4.5. Note que os estados  $V_i$  e  $V_{poc}$  possuem quatro valores correspondentes às informações do sensor virtual em que para  $h_1(V_i)$  tem-se  $h_1^1(V_i) = S_{ar}$ ,  $h_1^2(V_i) = S_{ad}$ ,  $h_1^3(V_i) = S_{br}$  e  $h_1^4(V_i) = S_{bd}$  e para  $h_1(V_{poc})$  tem-se que  $h_1^1(V_{poc}) = S_{ar}$ ,  $h_1^2(V_{poc}) = S_{ad}$ ,  $h_1^3(V_{poc}) = S_{br}$  e  $h_1^4(V_{poc}) = S_{bd}$ . Isso ocorre porque nos estados  $V_i$  e  $V_{poc}$  não é possível determinar quais são as leituras dos sensores. Por exemplo, no estado inicial da válvula não é possível afirmar se o nível está subindo ou descendo e se ele está acima ou abaixo do *setpoint*; o mesmo acontece para o estado em que a válvula está parcialmente aberta. Note também que os estados  $V_{tf}$  e  $V_{ta}$  possuem dois valores correspondentes às informações do sensor virtual em que para  $h_1(V_{tf})$  tem-se  $h_1^1(V_{tf}) = S_{br}$  e  $h_1^2(V_{tf}) = S_{ar}$  e para  $h_1(V_{ta})$  tem-se  $h_1^1(V_{ta}) = S_{bd}$  e  $h_1^2(V_{ta}) = S_{ad}$ . Nesses estados, só é possível determinar o sentido da variável após a falha, não sendo possível determinar se ela está acima ou abaixo do *setpoint*. O MS-IEL irá lidar com essa situação no algoritmo 3.1 em que realiza o desmembramento dos estados que apresentam mais de uma leitura. Nos outros estados do autômato  $\tilde{G}$  é possível precisar as informações enviadas pelos sensores. Por exemplo, quando a válvula está totalmente fechada, estado  $V_c$ , a informação do sensor de nível/pressão estará abaixo do *setpoint* e irá aumentar, isto é  $S_{br}$ , pela característica do controlador *PI* sintonizado para este

sistema. Outro exemplo é o estado  $V_o$  que modela a válvula totalmente aberta. Nesse caso a informação enviada pelo sensor será  $S_{ad}$ .

Como foi observado no comportamento dinâmico integrado da UST, mostrado na seção 4.2.1, a resposta da razão da pressão diferencial  $P_{dr}$  em relação à ação da válvula  $S_{o_3}$  possui efeito contrário se comparado com as respostas das variáveis  $h_o$ ,  $h_w$  e  $p$  em relação às ações das válvulas  $S_o$ ,  $S_{w_3}$  e  $S_g$ . Ou seja, enquanto a  $P_{dr}$  reduz com o fechamento da válvula  $S_{o_3}$ , as variáveis  $h_o$ ,  $h_w$  e  $p$  reduzem com a abertura das respectivas válvulas. Logo, os MDS das válvulas  $S_o$ ,  $S_{w_3}$  e  $S_g$  são iguais entre si e diferentes do MDS para a válvula  $S_{o_3}$ . O MDS com a informação do sensor de pressão diferencial e de *setpoint* para o autômato  $\tilde{G}$  da válvula  $S_{o_3}$  possui construção análoga ao das outras válvulas anteriormente descritas e é exibido na tabela 4.6.

Tabela 4.6: MDS para o autômato  $\tilde{G}$  que modela o comportamento da válvula  $S_{o_3}$ .

Estados de $\tilde{G}$	Sensor Virtual
$V_i$	$S_{ar}; S_{ad}; S_{br}; S_{bd}$
$V_{poc}$	$S_{ar}; S_{ad}; S_{br}; S_{bd}$
$V_o$	$S_{br}$
$V_c$	$S_{ad}$
$V_{tf}$	$S_{bd}; S_{ad}$
$V_{ta}$	$S_{br}; S_{ar}$

De posse do autômato  $\tilde{G}$  e do MDS pode-se, então, aplicar o MS-IEL. Os autômatos que modelam o comportamento da UST e as operações de composições foram implementados em *DESLAB*, conforme código do repositório [28].

A aplicação do algoritmo 3.1 de Desmembramento de Estados com  $j = 1$  resulta no autômato  $G_{db_1}$ . Este autômato possui 15 estados e 132 transições, representado em formato de tabela no Apêndice E. O  $MDS_{db_1}$ , está descrito na tabela 4.7. Note que o  $MDS_{db_1}$  possui os novos estados que foram desmembrados em  $G_{db_1}$  e as respectivas saídas dos sensores também foram acrescentadas na coluna equivalente ao sensor de maneira que cada estado está mapeado com apenas uma leitura.

Aplicando-se, agora, o algoritmo 3.2 ao autômato  $G_{db_1}$  e ao  $MDS_{db_1}$ , obtém-se o autômato  $G_{s_1}$  que modela o comportamento do sensor virtual. O autômato  $G_{s_1}$  possui 119 estados e 441 transições, está representado em formato de tabela no Apêndice F.

### 4.3.3 Autômato do Controlador $G_c$

A Unidade de Separação Trifásica é composta por quatro controladores *PI* com realimentação, figura 4.2, em que os comandos para abertura/fechamento das válvula são ajustados de acordo com a diferença entre o sinal desejado (*setpoint*) e

Tabela 4.7:  $MDS_{db_1}$  para o autômato  $G_{db_1}$ .

Estados de $G_{db_1}$	Sensor Virtual
$V_o$	$S_{ad}$
$V_c$	$S_{br}$
$V_{i0new}$	SL
$\langle V_i, S_{ad} \rangle$	$S_{ad}$
$\langle V_i, S_{bd} \rangle$	$S_{bd}$
$\langle V_i, S_{br} \rangle$	$S_{br}$
$\langle V_i, S_{ar} \rangle$	$S_{ar}$
$\langle V_{so}, S_{ad} \rangle$	$S_{ad}$
$\langle V_{so}, S_{bd} \rangle$	$S_{bd}$
$\langle V_{poc}, S_{ad} \rangle$	$S_{ad}$
$\langle V_{poc}, S_{bd} \rangle$	$S_{bd}$
$\langle V_{poc}, S_{br} \rangle$	$S_{br}$
$\langle V_{poc}, S_{ar} \rangle$	$S_{ar}$
$\langle V_{sc}, S_{ar} \rangle$	$S_{ar}$
$\langle V_{sc}, S_{br} \rangle$	$S_{br}$

o sinal efetivamente medido na planta através dos sensores.

O projeto em SEDs do controlador é o resultado da observações dos comandos dos controladores  $PI$  da planta no comportamento integrado do processo. Diante disso, três especificações foram elaboradas para o comportamento do controlador  $PI$ . O autômato  $G_c$  é obtido através da composição paralela dos autômatos que modelam as três especificações descritas a seguir:

1. O Comando de fechar totalmente a válvula ( $C_t$ ), que é uma medida drástica desse controlador, só acontece após o evento  $S_{bd}$ , que modela a medição abaixo do *setpoint* e descendo. Essa especificação é modelada pelo autômato  $G_{c1}$  da figura 4.12;
2. Analogamente ao item 1, o comando de abrir totalmente a válvula ( $O_t$ ), que é uma medida drástica, só acontece após o evento  $S_{ar}$ , que modela a medição acima do *setpoint* e subindo. Essa especificação é modelada pelo autômato  $G_{c2}$  da figura 4.13;
3. Os comandos de controle e leitura são alternados. O controlador inicialmente observa um evento de leitura do sensor com os eventos:  $S_{ar}$ ,  $S_{ad}$ ,  $S_{br}$  ou  $S_{bd}$  para, em seguida, tomar uma ação com um dos eventos:  $C_t$ ,  $O_t$  ou  $P_{oc}$ . Essa especificação é modelada pelo autômato  $G_{c3}$  da figura 4.14;

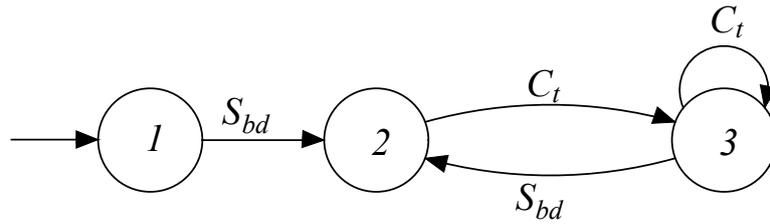


Figura 4.12: Autômato  $G_{c1}$ .

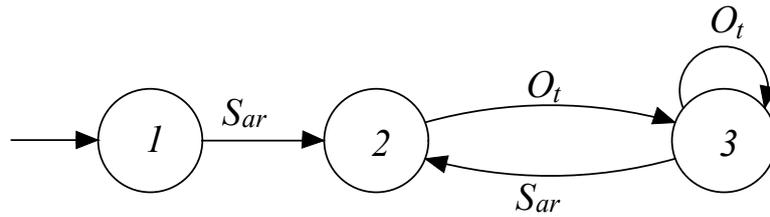


Figura 4.13: Autômato  $G_{c2}$ .

A limitação do comportamento do controlador em relação aos comandos de atuação que são permitidos na válvula tem a objetivo de tornar a modelagem em SED mais realista. O comportamento completo do controlador é o resultado da operação  $G_c = G_{c1} || G_{c2} || G_{c3}$ , esse autômato possui 18 estados e 51 transições, ele está representado em formato de tabela no Apêndice G.

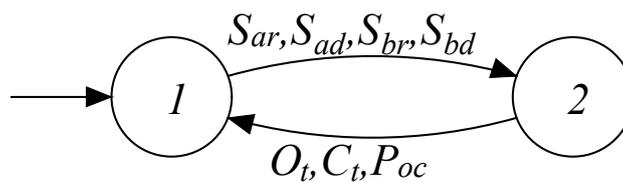


Figura 4.14: Autômato  $G_{c3}$ .

### 4.3.4 Gerador de Eventos

O gerador de eventos é elaborado com o objetivo de transformar as informações da evolução das variáveis contínuas do processo em eventos de bordas de subida ou descida para o sistema a eventos discretos. O gerador de eventos, figura 4.15, recebe como entradas as variáveis contínuas de: (i) nível/pressão; (ii) comando que o controlador envia para a válvula; e (iii) valor do *setpoint*. As suas saídas são pulsos com as informações de: (i)  $S_{ar}$ , medição acima do *setpoint* e aumentando; (ii)  $S_{bd}$ , medição abaixo do *setpoint* e descendo; (iii)  $S_{br}$ , medição abaixo do *setpoint* e aumentando; (iv)  $S_{ad}$ , medição acima do *setpoint* e descendo; (v)  $O_t$ , comando para a válvula fechar totalmente; (vi)  $C_t$ , comando para a válvula fechar totalmente; e (vii)  $P_{oc}$ , comando para a válvula abrir/fechar parcialmente.

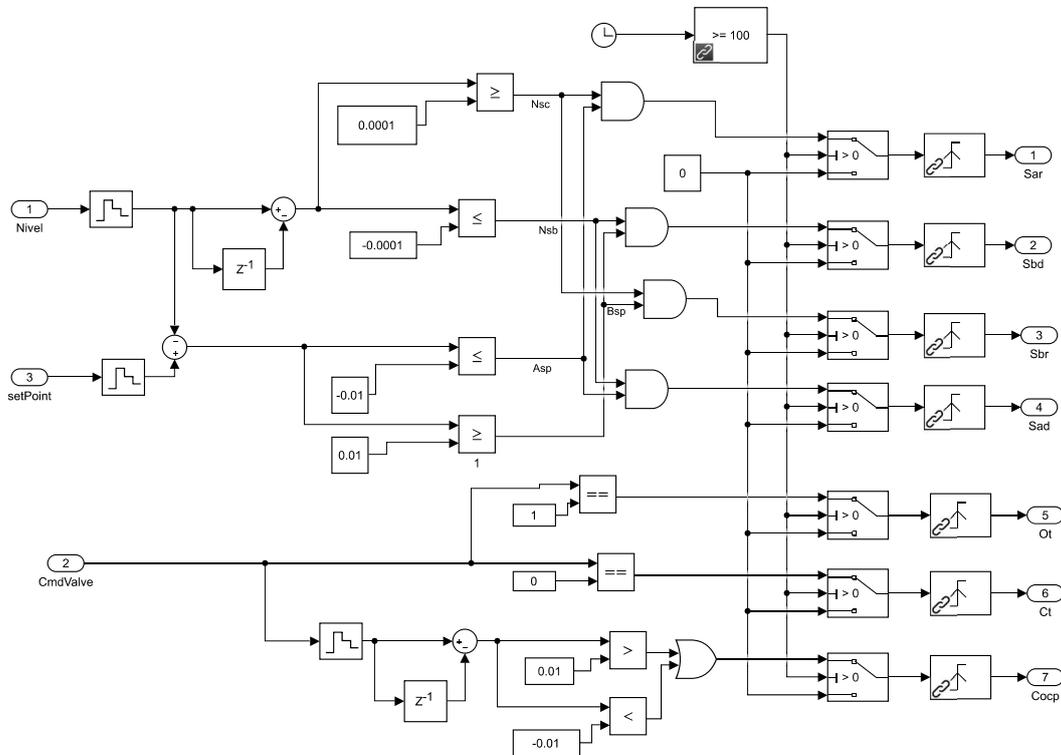


Figura 4.15: Gerador de eventos.

O gerador de eventos só começa a produzir sinais após  $t \geq 100s$  pois, a partir desse instante o grau de perturbação da inicialização das variáveis está reduzido, mesmo que o sistema ainda não tendo alcançado o estado estacionário.

### 4.3.5 Diagnosticador *Online* $G_d$

Antes de aplicar o diagnosticador *online* à UST é necessário avaliar a diagnosticabilidade do modelo em SED. O autômato que modela a planta em SED

é obtido a partir da composição paralela  $G = \tilde{G}||G_s||G_c$ , conforme ilustrado na figura 4.10. O autômato  $G$  possui 384 estados e 822 transições e teve seus estados renomeados para melhor apresentação em formato de tabela no Apêndice H. Através da *toolbox diagnosis* do programa computacional *DESLAB*[22] é possível verificar que a  $L(G)$  é diagnosticável em relação a  $P_o$  e a  $\Sigma_f$ . Diante disso, o próximo passo é inserir o diagnosticador de falhas no processo da UST.

Na implementação do diagnosticador optou-se por construir um autômato  $G_d = Obs(G||A_l)$  para a falha travada-aberta e outro para a falha travada-fechada de cada uma das válvulas  $S_o$ ,  $S_{w3}$ ,  $S_g$  e  $S_{o3}$ . Cada diagnosticador possui 185 estados e 445 transições. O autômato  $G_d$  para a falha travada-aberta está descrito em formato de tabela do Apêndice I.

A implementação dos diagnosticadores no Simulink® acontece em duas etapas. Na primeira, exporta-se do *DESLAB* seis arquivos de texto que possuem as seguintes informações sobre cada diagnosticador: (i) Estado Inicial; (ii) Eventos; (iii) Estados; (iv) Estado de origem de cada transição; (v) Estado de destino de cada transição; e (vi) Eventos de cada transição. Na segunda etapa, um *script* do Matlab® é implementado para importar os dados do autômato em formato de arquivo de texto e construir os autômatos no Simulink® automaticamente. Os códigos fontes dessas etapas foram inseridos nos repositórios [29] e [30], respectivamente.

## 4.4 Simulações e Resultados

As simulações foram realizadas *software Simulink*®. As falhas das válvulas nas posições travada-aberta e travada-fechada foram programadas para ocorrer em  $t = 3000s$ . Foram considerados dois cenários para o fluxo das entradas na UST. No primeiro, o fluxo das entradas é considerado constante, em que a entrada multifásica é composta por  $0,0133m^3/s$  de água,  $0,0167m^3/s$  do óleo e  $0,13m^3/s$  do gás. No segundo cenário, considera-se o fluxo de entrada em padrão de golfadas com o intuito de observar a robustez do diagnosticador.

### 4.4.1 Diagnóstico de Falhas com Fluxo de Alimentação Constante

#### 4.4.1.1 Falha na válvula de óleo $S_o$ do vaso separador

A primeira simulação foi feita assumindo a falha da válvula  $S_o$  na posição trava-aberta. O comportamento das variáveis controladas é ilustrado na figura 4.16, nota-se que o nível do óleo cai bruscamente uma vez que a vazão de saída para a válvula  $S_o$  totalmente aberta é de  $0,034m^3/s$ , culminando no esvaziamento completo da câmara de óleo em aproximadamente  $40s$ . Em consequência, a pressão

no separador também reduz e é rapidamente corrigida pelo controlador fechando parcialmente a válvula  $S_g$ , figura 4.17 (c). É possível observar na figura 4.17 (a) que o controlador comanda fechar totalmente a válvula  $S_o$  ( $cmdSo=0$ ) mas ela permanece na posição travada-aberta ( $So=1$ ).

O diagnosticador identifica a falha travada-aberta na válvula  $S_o$  após 16<sub>s</sub> da sua ocorrência, figura 4.18 (a). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

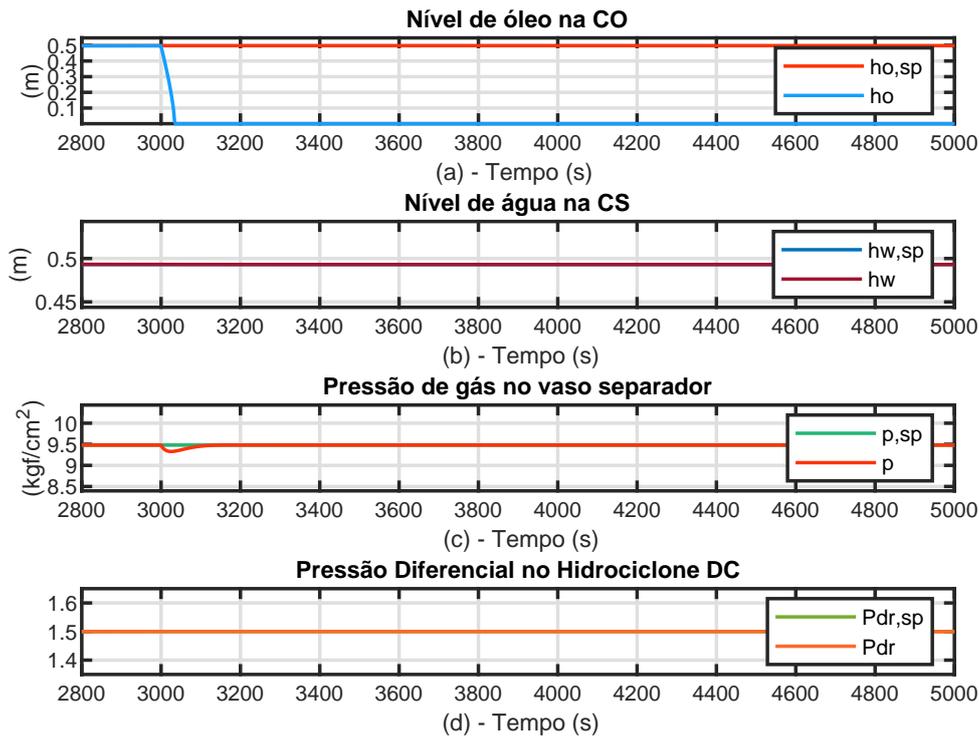


Figura 4.16: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_o$ .

Em seguida, foi realizada a simulação de falha na válvula  $S_o$  na posição travada-fechada. Nessa situação o nível do óleo sobe ininterruptamente até o limite máximo de 0,87m em 38s, figura 4.19 (a). Observa-se um pequeno aumento da pressão no separador, 4.19 (c), que é corrigido pelo controlador abrindo parcialmente a válvula de gás, 4.20 (c).

O diagnosticador identifica a falha travada-fechada na válvula  $S_o$  após 8<sub>s</sub> da sua ocorrência, figura 4.21 (a). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

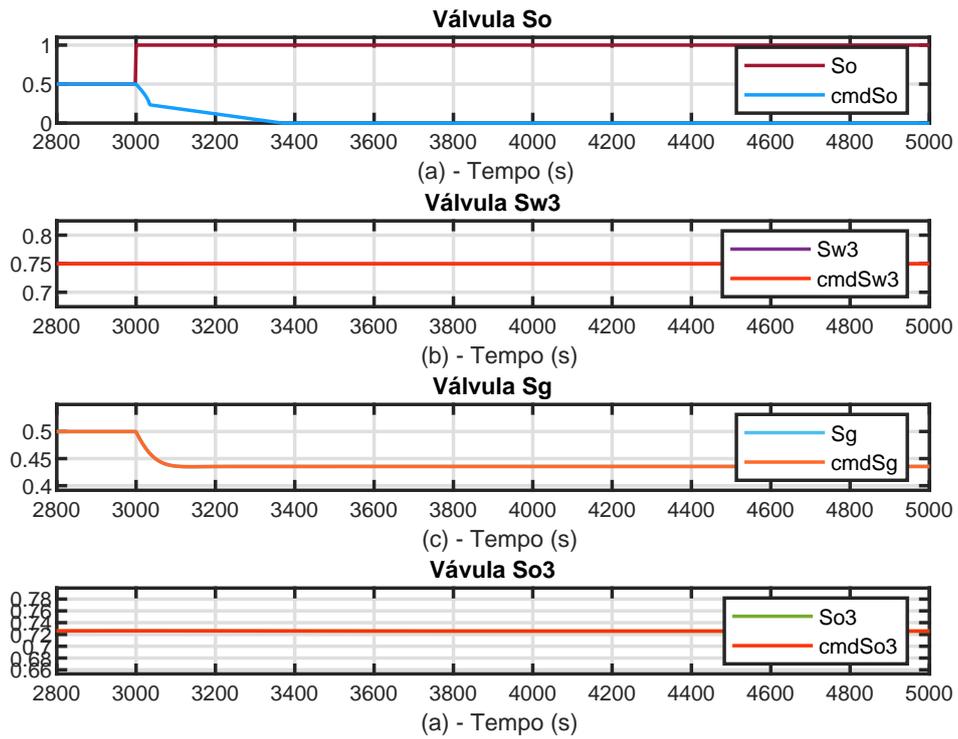


Figura 4.17: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_o$ .

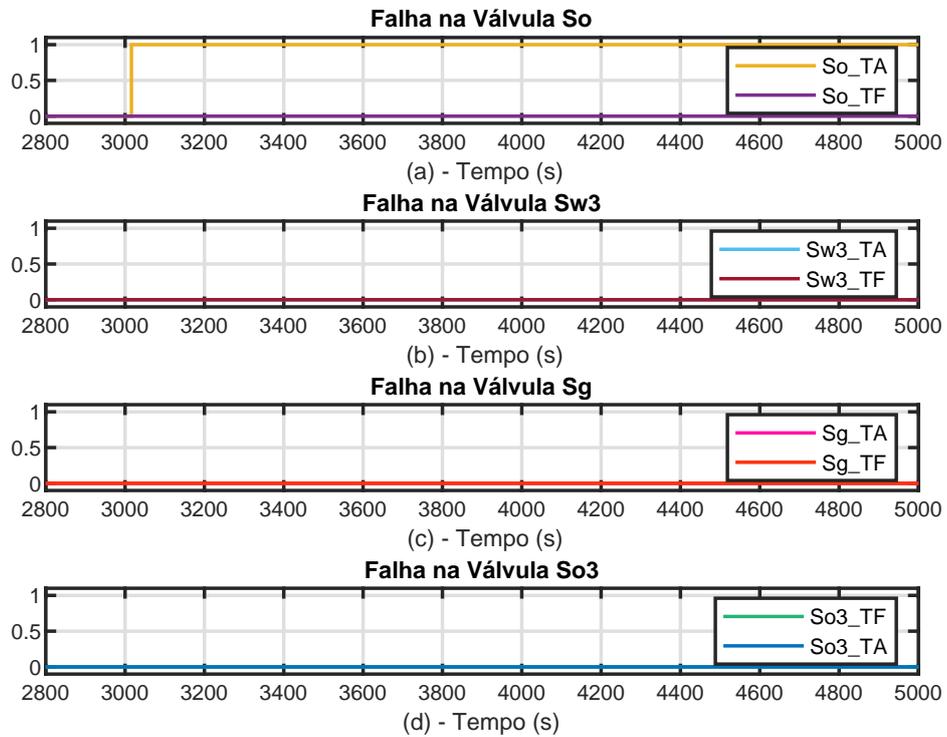


Figura 4.18: Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula  $S_o$ .

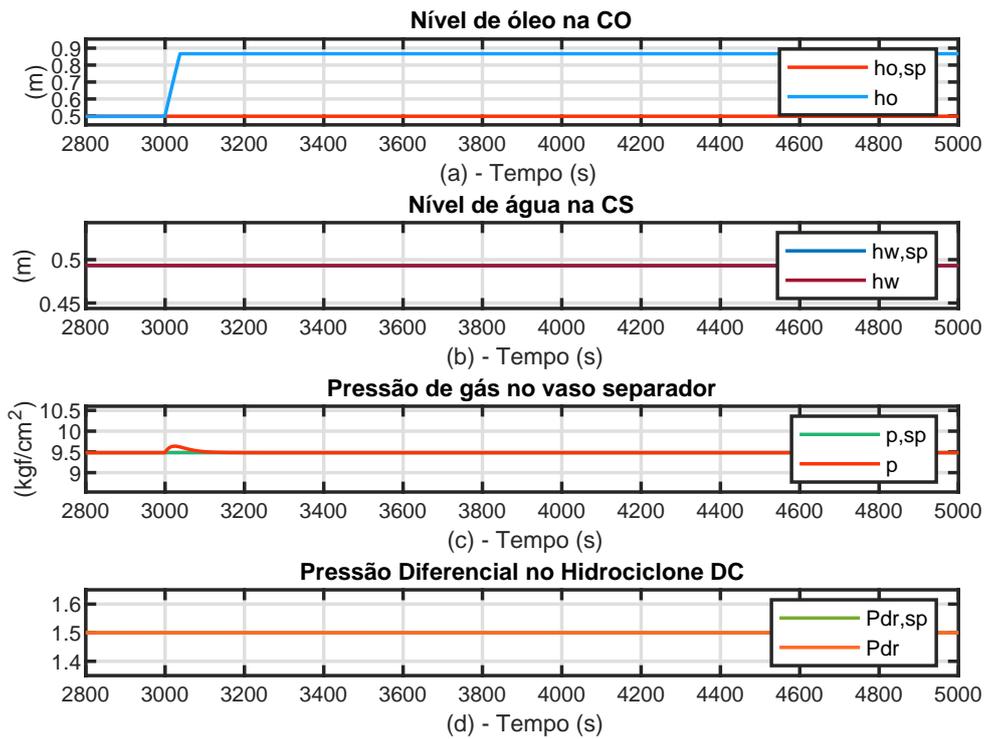


Figura 4.19: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_o$ .

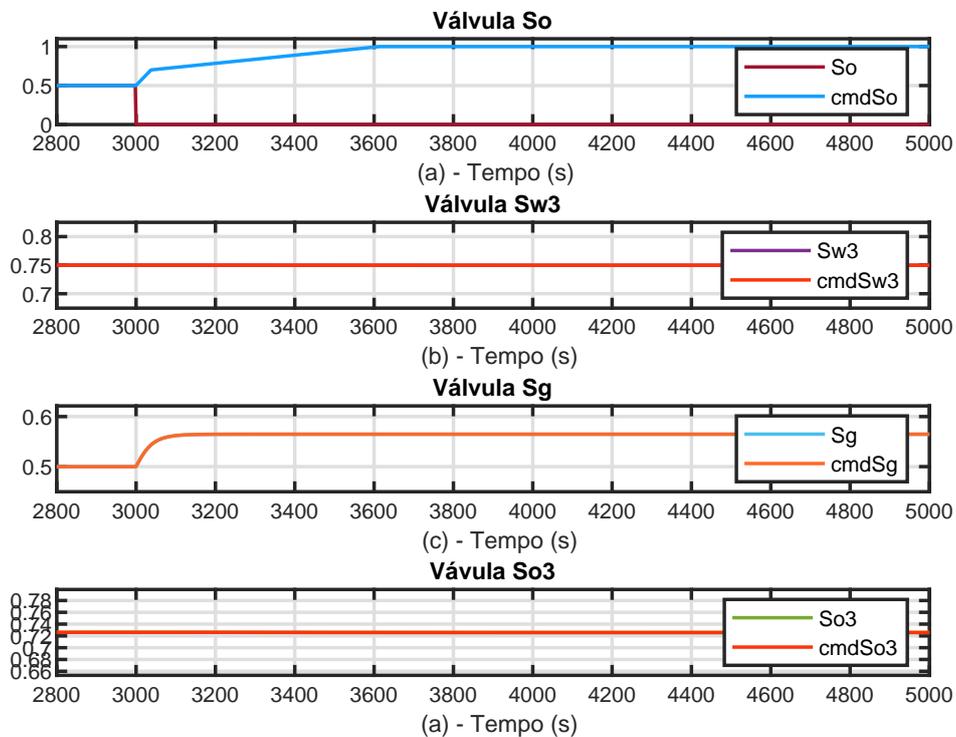


Figura 4.20: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_o$ .

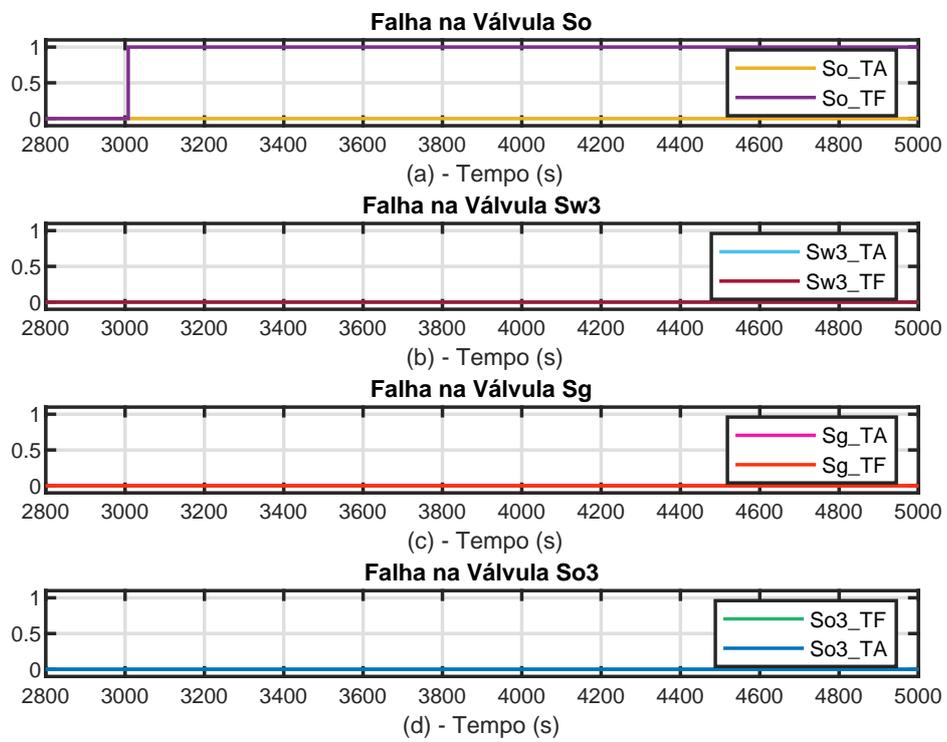


Figura 4.21: Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula  $S_o$ .

#### 4.4.1.2 Falha na Válvula de Água $S_{w_3}$ do Hidrociclone DC

Outra simulação realizada foi a que contempla a falha da válvula  $S_{w_3}$  na posição travada-aberta. É possível observar na figura 4.22 (b) que o nível da água na câmara de separação desceu lentamente até alcançar o valor 0 em  $t = 4128s$ , fato que interrompe a simulação. Note que o nível de óleo na câmara de óleo reduziu, figura 4.22 (a), e em seguida foi regulado pelo controlador que abriu a válvula  $S_o$ , figura 4.23 (a). Já a pressão diferencial no hidrociclone DC não voltou ao *setpoint*, figura 4.22 (d), mesmo após a abertura total da válvula  $S_{o_3}$ , figura 4.23 (d), por conta das diferenças de carga e de vazões acima e abaixo do hidrociclone *DC*.

O diagnosticador identifica a falha travada-aberta na válvula  $S_{w_3}$  após  $88_s$  da sua ocorrência, figura 4.24 (b). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

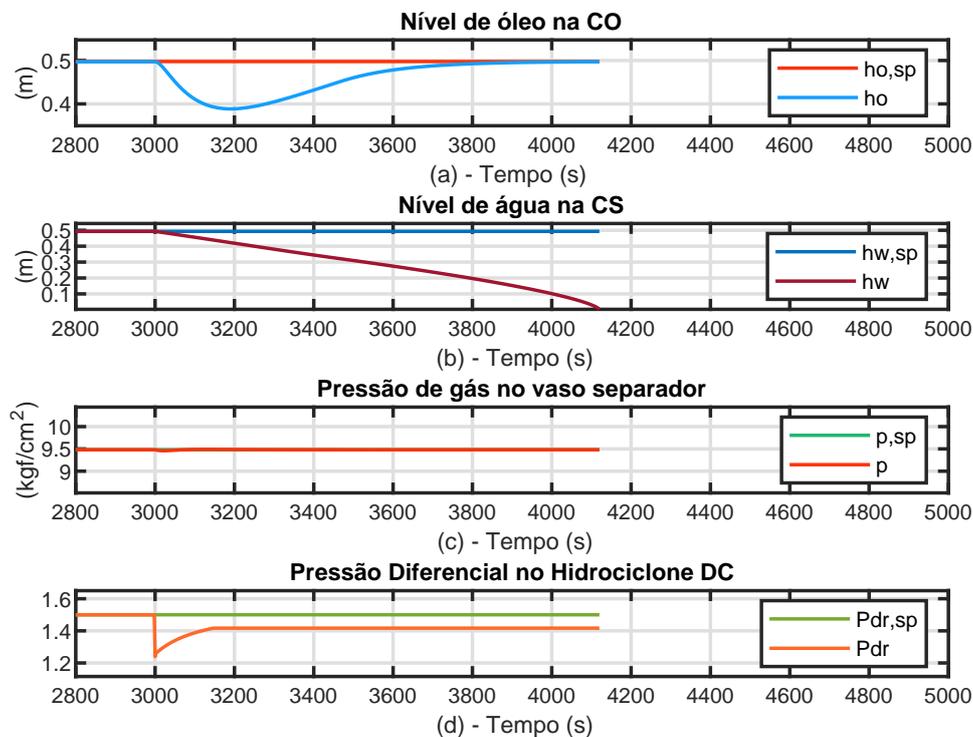


Figura 4.22: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_{w_3}$ .

Na figura 4.25 está ilustrado o resultado das variáveis controladas para a válvula  $S_{w_3}$  na posição travada-fechada. Note que há elevações de todas as variáveis controladas após a ocorrência dessa falha. O nível da câmara de óleo atinge o limite máximo após  $70s$  do acontecimento da falha, figura 4.25 (a), e aproximadamente no instante  $t = 4000s$  o nível do óleo retorna até o valor do *setpoint*. O nível da água também subiu dentro da câmara de separação, porém como a câmara de separação é maior do que a câmara de óleo, a *SC* atingiu seu limite após  $232s$ , 4.25 (b). A

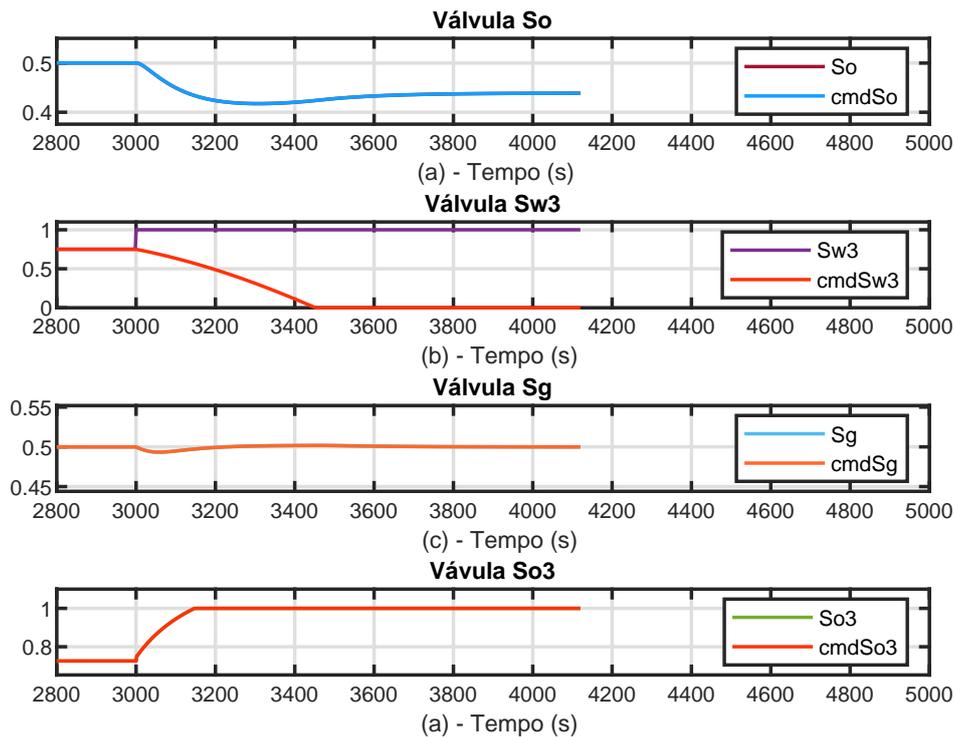


Figura 4.23: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_{w3}$ .

pressão no separador também aumentou levemente, figura 4.25 (c), e foi corrigida pelo controlador atuando na válvula  $S_g$ , figura 4.26 (c). A pressão diferencial não pôde ser corrigida, mesmo com o fechamento total da válvula  $S_{o3}$ .

O diagnosticador identifica a falha travada-fechada na válvula  $S_{w3}$  após  $34_s$  da sua ocorrência, figura 4.27 (b), o que é inferior ao período que o nível do óleo levou para atingir o limite máximo na câmara de óleo e bem menor do que o tempo que nível da água atingiu o limite máximo. Em  $t = 3658s$  o diagnosticador identificou falha travada-aberta na válvula  $S_o$ , figura 4.27 (a), pois a câmara de separação atingiu seu limite máximo e o nível do óleo demorou a reduzir mesmo após o comando para a válvula  $S_o$  abrir totalmente ter sido enviado pelo controlador. Esse é um caso atípico, pois a falha na válvula  $S_{w3}$  já havia sido identificada muito tempo antes e, na prática, alguma ação de segurança deveria sido tomada pelo sistema antes da detecção da falha na válvula  $S_o$ . Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

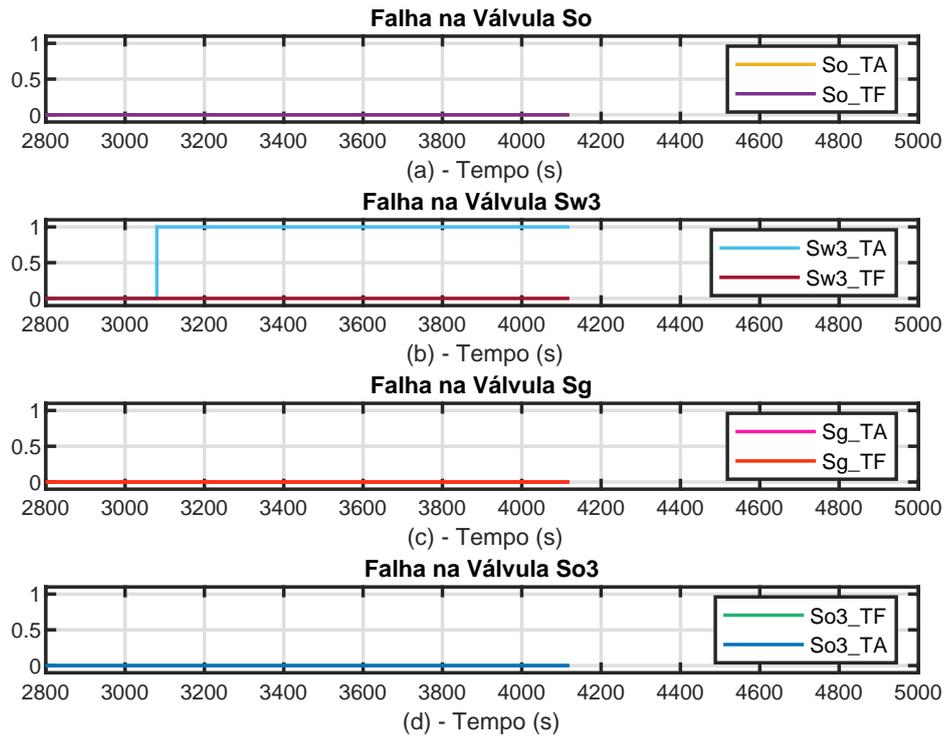


Figura 4.24: Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula  $S_{w3}$ .

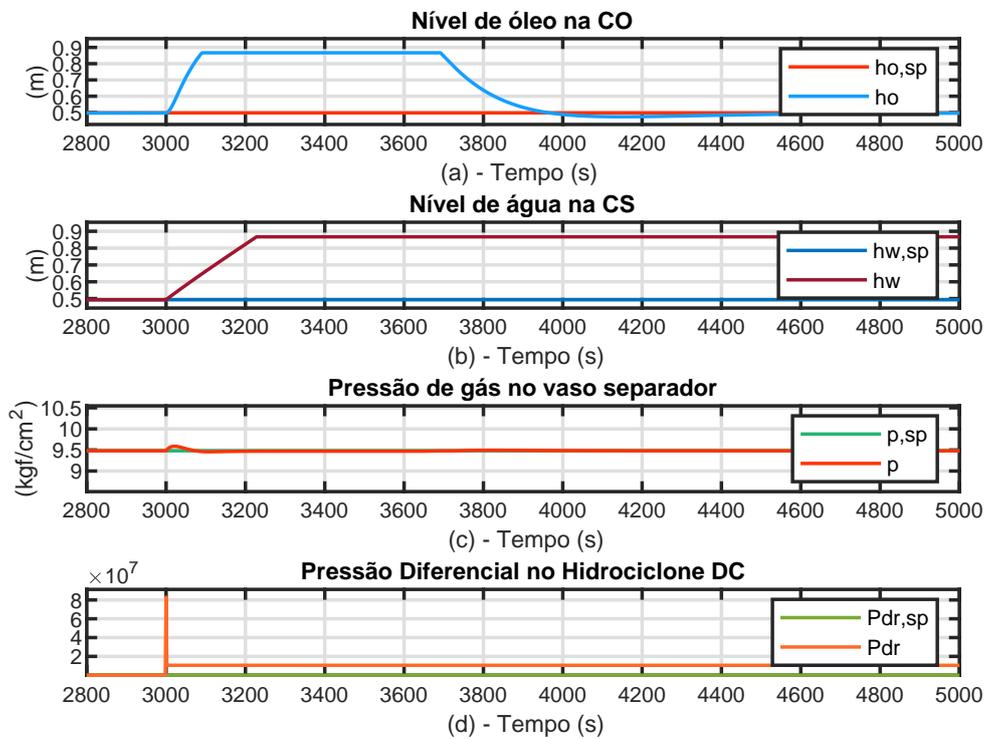


Figura 4.25: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_{w3}$ .

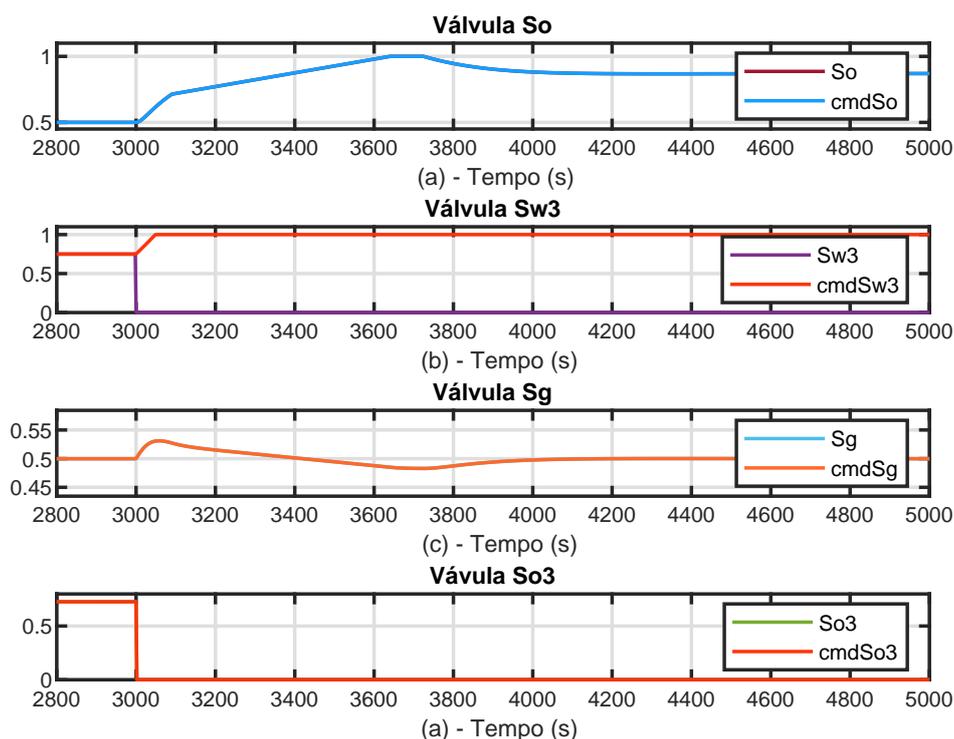


Figura 4.26: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_{w3}$ .

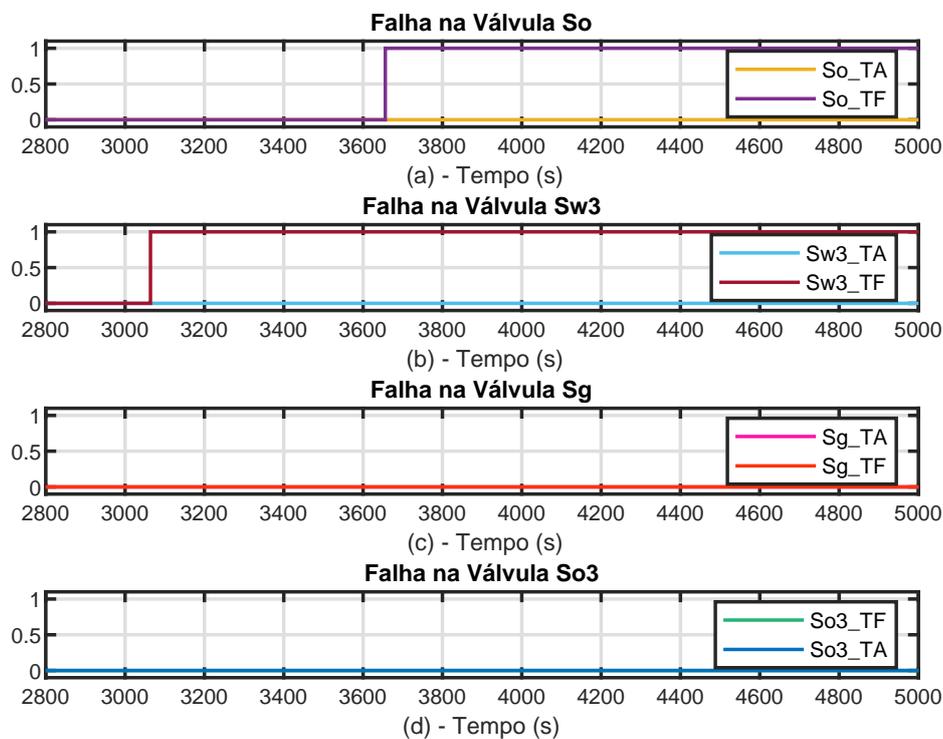


Figura 4.27: Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula  $S_{w3}$ .

#### 4.4.1.3 Falha na Válvula de Gás $S_g$ do Vaso Separador

Foram observados também o diagnóstico das falhas travada-aberta e travada-fechada na válvula  $S_g$ . O comportamento das variáveis controladas para  $S_g$  travada-aberta está ilustrado na figura 4.28. Percebe-se neste caso que a pressão de gás no separador reduziu abruptamente atingindo o patamar mínimo de  $8,78\text{kgf}/\text{cm}^2$  após  $25\text{s}$  da ocorrência da falha, figura 4.28 (c). Nota-se também uma pequena elevação do nível do óleo na câmara de óleo, figura 4.28 (a), que foi controlado a partir da abertura da válvula  $S_o$ , figura 4.29 (a).

O diagnosticador identifica a falha travada-aberta na válvula  $S_g$  após  $18\text{s}$  da sua ocorrência, figura 4.30 (c). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

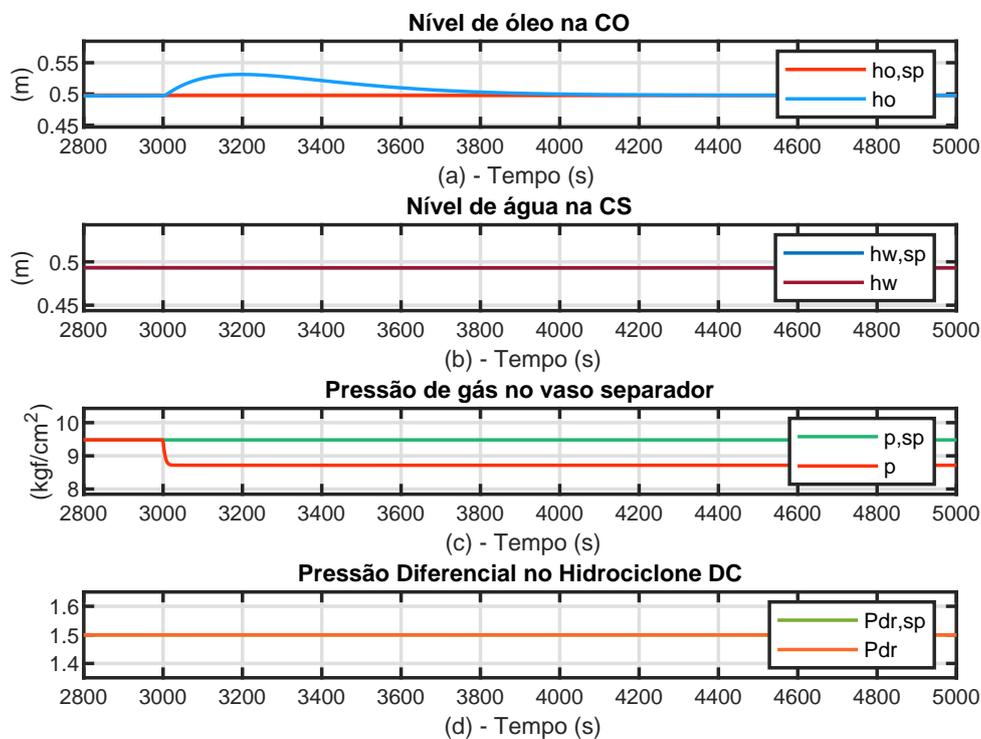


Figura 4.28: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_g$ .

O resultado da simulação para a válvula  $S_g$  travada-fechada está ilustrado na figura 4.31. A pressão do gás sobe rapidamente até  $15\text{kgf}/\text{cm}^2$  em  $36\text{s}$ , figura 4.31 (c), influenciando nível de óleo da câmara de óleo que reduz mas é controlado com o fechamento da válvula  $S_o$ , figura 4.32 (a). As outras variáveis controladas não se alteram.

O diagnosticador identifica a falha travada-fechada na válvula  $S_g$  após  $16\text{s}$  da sua ocorrência, figura 4.33 (c). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

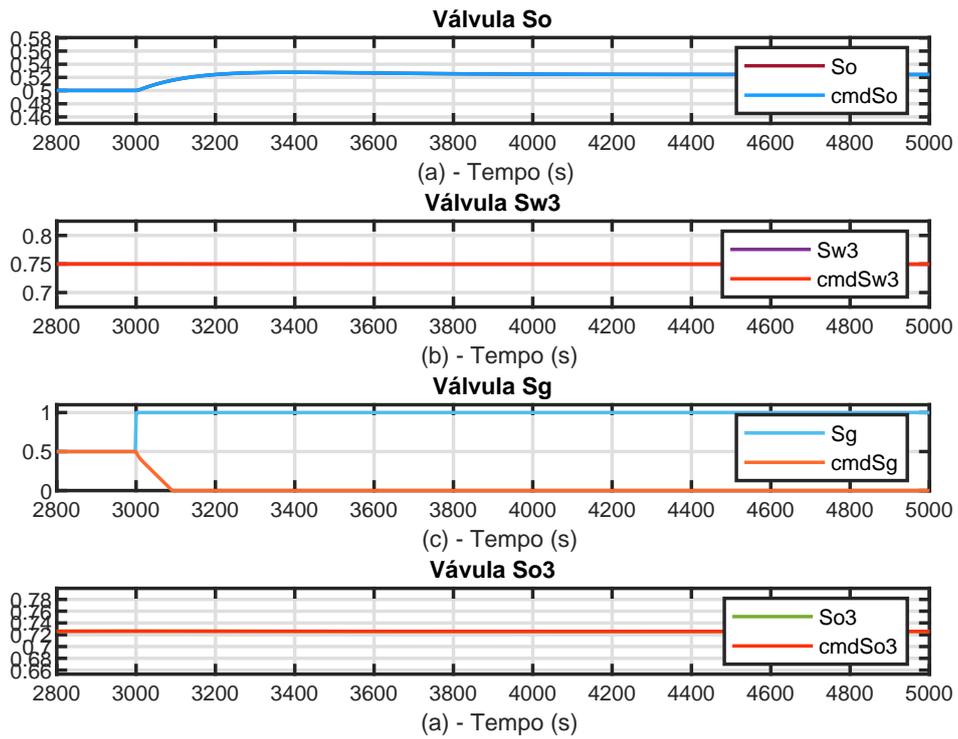


Figura 4.29: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_g$ .

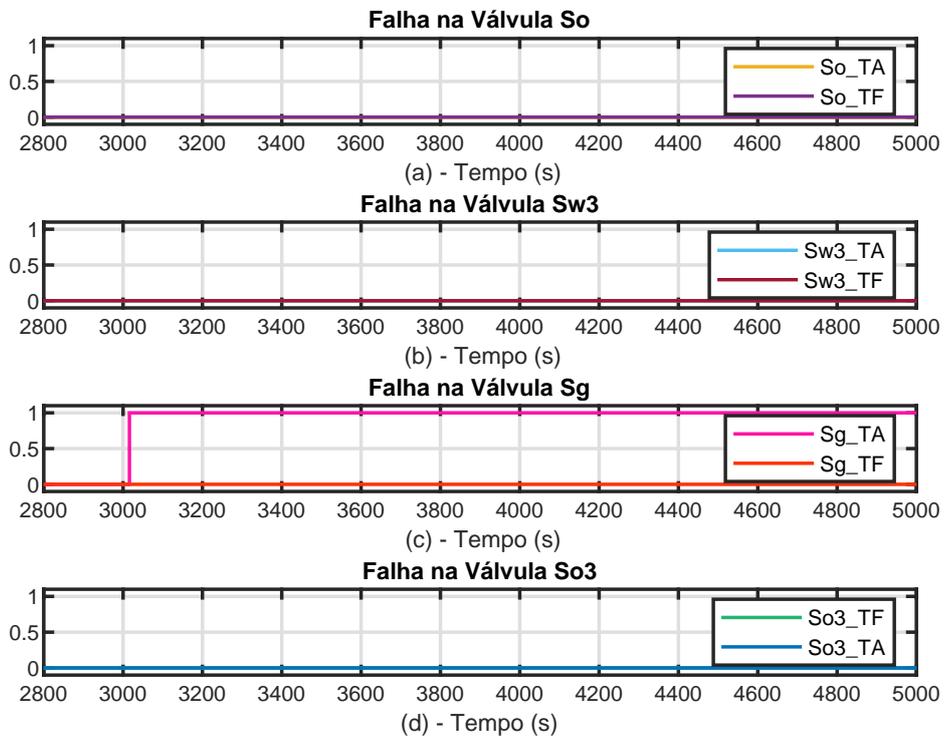


Figura 4.30: Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula  $S_g$ .

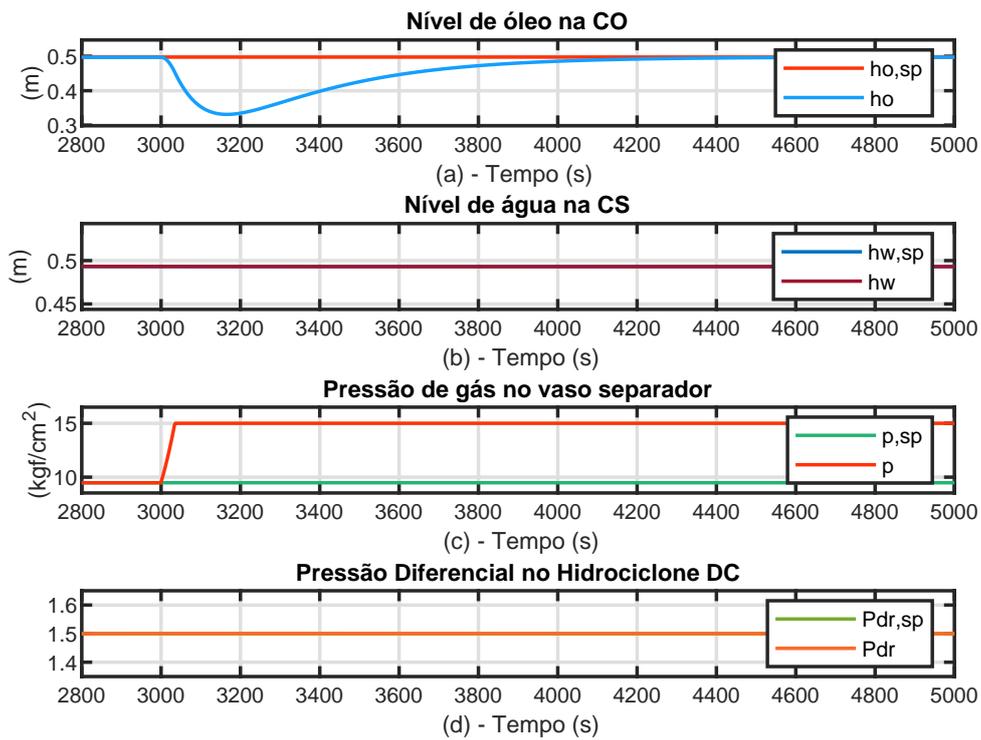


Figura 4.31: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_g$ .

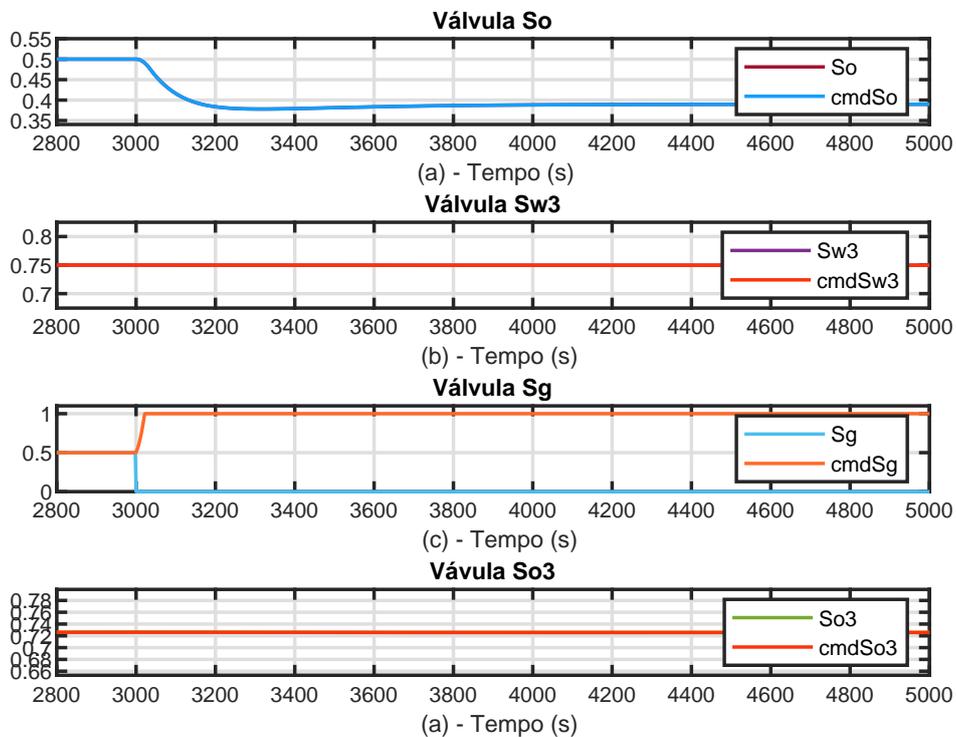


Figura 4.32: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_g$ .

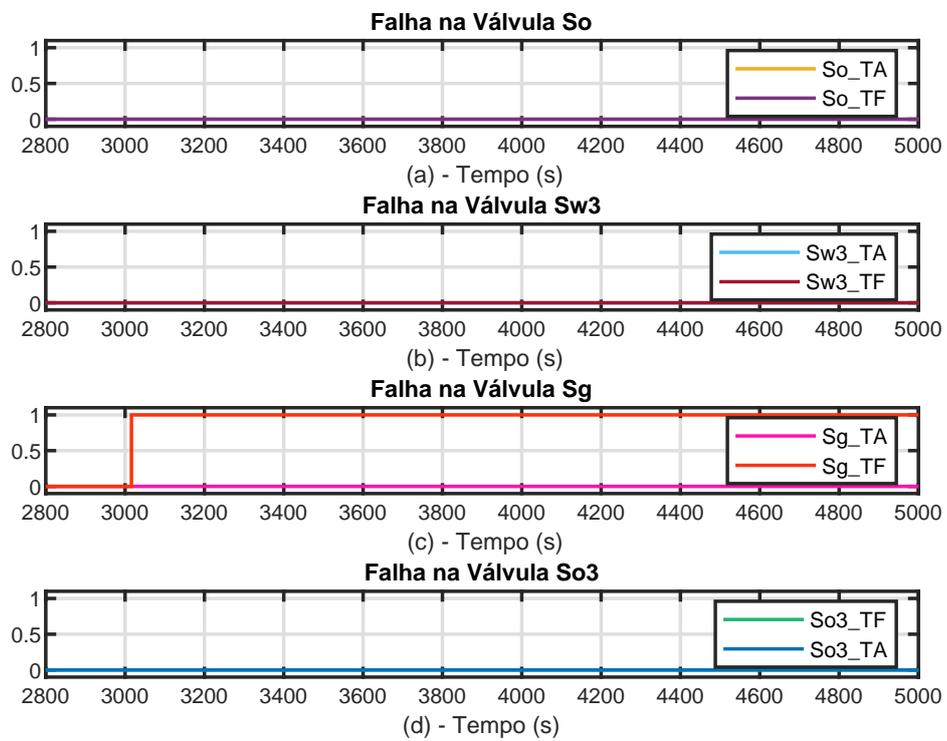


Figura 4.33: Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula  $S_g$ .

#### 4.4.1.4 Falha na Válvula de Óleo $S_{o_3}$ do Hidrociclone DC

Foram realizados testes de falhas na válvula  $S_{o_3}$ . No primeiro deles considerou-se a falha travada-aberta para esta válvula, o resultado das variáveis controladas está ilustrado na figura 4.34. A pressão diferencial aumenta rapidamente e alcança o patamar de 1,72 após 8s da ocorrência da falha, figura 4.34 (d). As outras variáveis controladas não se alteram e não há comandos significativos nas válvulas, exceto a  $S_{o_3}$ , figura 4.35.

O diagnosticador identifica a falha travada-aberta na válvula  $S_{w_3}$  após 14s da sua ocorrência, figura 4.36 (d). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador nesta simulação.

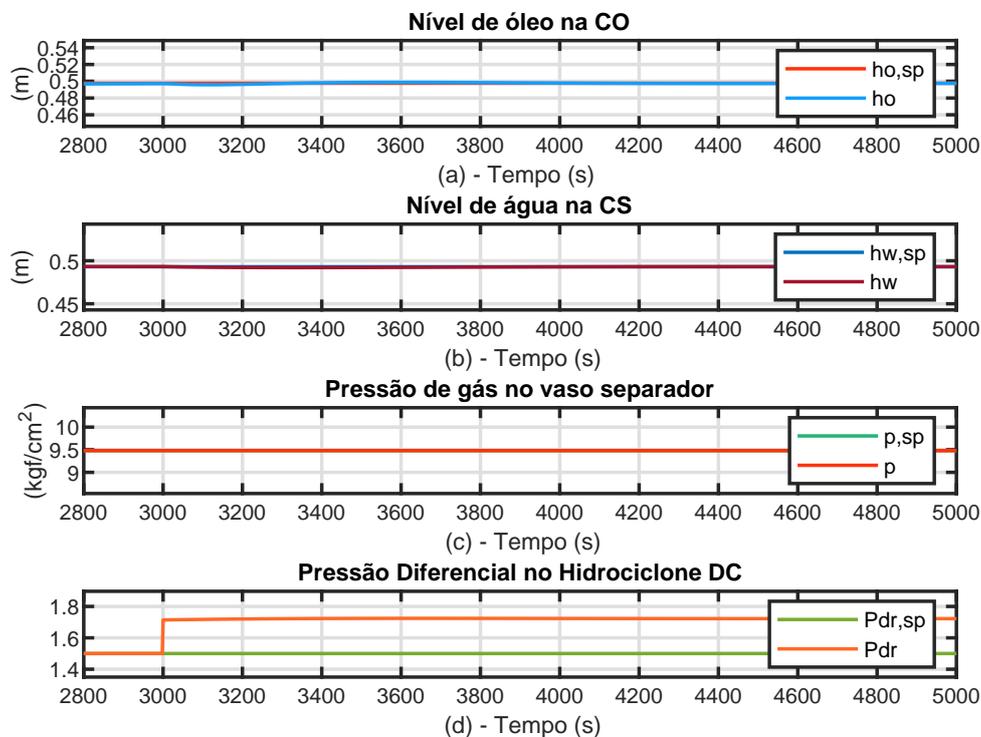


Figura 4.34: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_{o_3}$ .

Em seguida, considerou-se a falha travada-aberta da válvula  $S_{o_3}$ , o resultado da simulação está ilustrado na figura 4.37. A pressão diferencial reduz até 0,19 após 10s da ocorrência da falha, figura 4.37 (d). As demais variáveis controladas se alteram muito, o que demanda algumas alterações de nas posições das válvulas, figura 4.38.

O diagnosticador identifica a falha travada-fechada na válvula  $S_{w_3}$  após 22s da sua ocorrência, figura 4.39 (d). Nenhuma outra falha foi detectada pelo diagnosticador.

A síntese dos tempos para o diagnóstico das válvulas está apresentada na tabela 4.8.

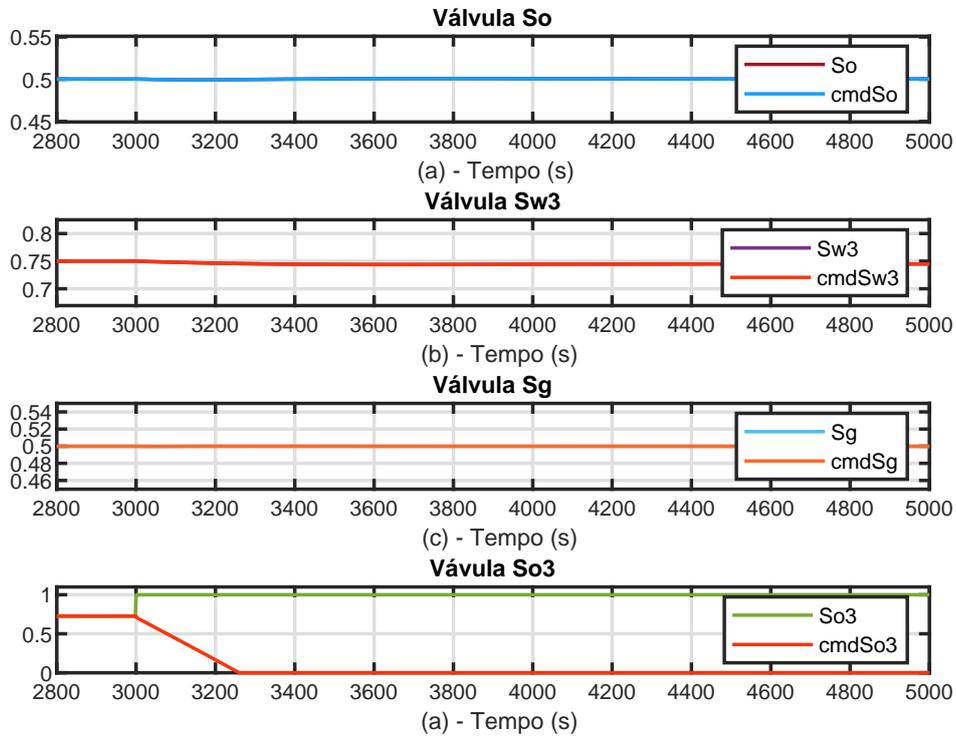


Figura 4.35: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_{o3}$ .

Tabela 4.8: Síntese dos tempos de diagnóstico das falhas para cada válvula.

Válvula	$t_a$	$t_f$
$S_o$	16s	8s
$S_{w3}$	88s	34s
$S_g$	18s	16s
$S_{o3}$	14s	22s

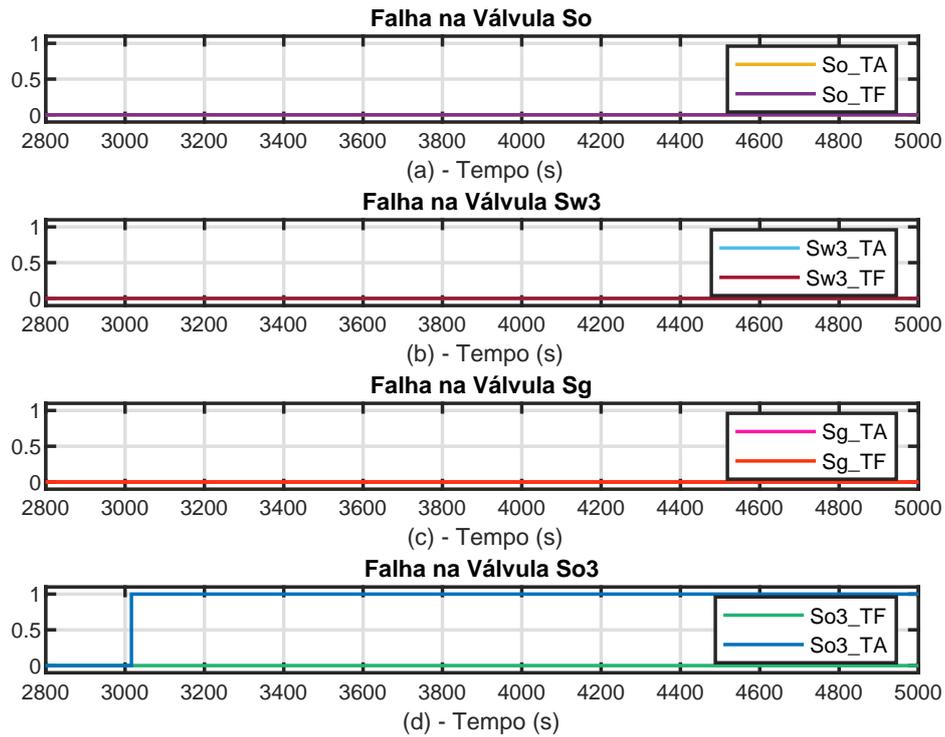


Figura 4.36: Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula  $S_{O_3}$ .

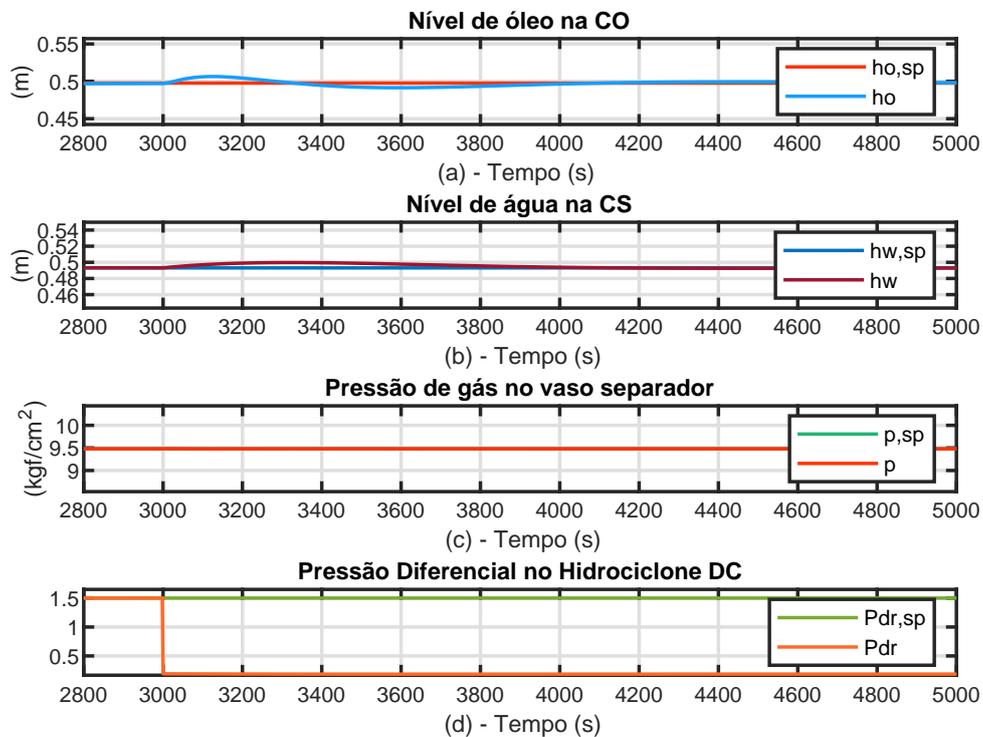


Figura 4.37: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_{O_3}$ .

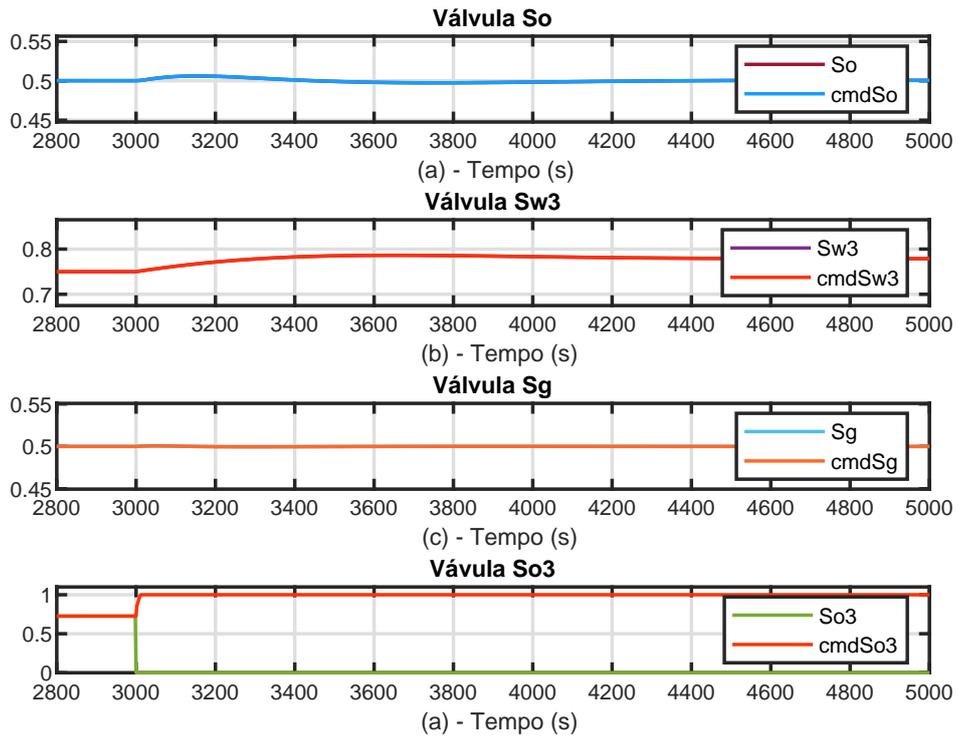


Figura 4.38: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_{o3}$ .

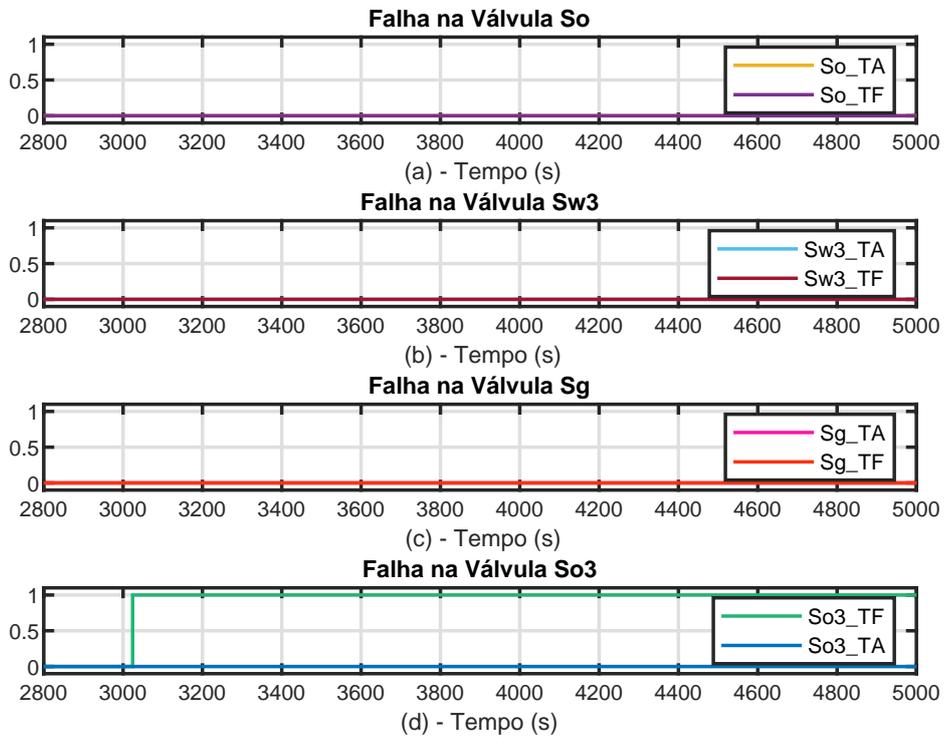


Figura 4.39: Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula  $S_{o3}$ .

#### 4.4.2 Diagnóstico de Falhas com Fluxo de Alimentação em Padrão de Golfadas

Foram realizadas simulações de falhas nas válvulas para a alimentação do sistema em padrão de golfadas. As golfadas são flutuações na corrente de alimentação que produzem oscilações nas pressões e nas vazões do processo, as quais podem causar severos problemas na operação da plataforma de produção [31]. A modelagem desse tipo de entrada foi implementada variando-se as entradas em 20% para mais e para menos, conforme ilustrado na figura 4.40. O comportamento das variáveis controladas está apresentado na figura 4.41 e a atuação dos controladores sobre as válvulas é apresentada na figura 4.42.

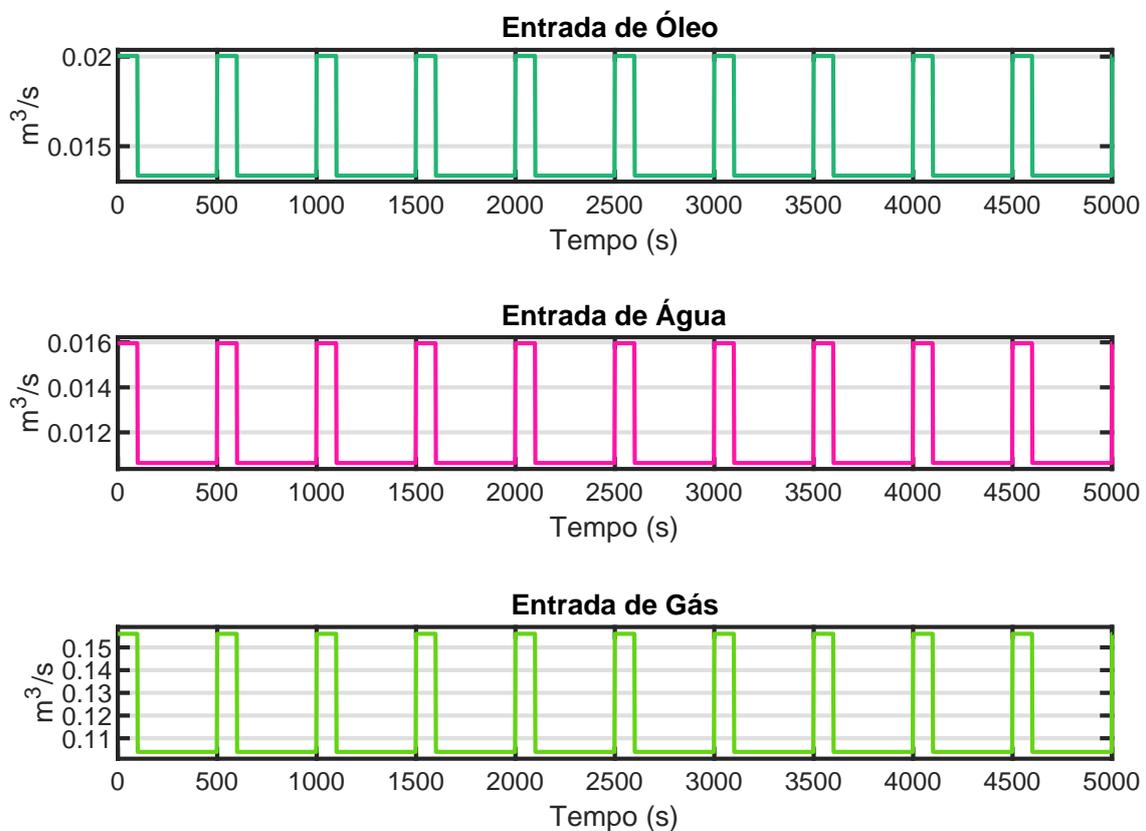


Figura 4.40: Fluxo de golfadas nas entradas.

Nesta situação de operação sob golfadas, foi simulada a falha travada-aberta na válvula  $S_o$  em  $t = 3000s$ . O comportamento das variáveis controladas está representado na figura 4.43 em que é possível observar a redução do nível de óleo na câmara de óleo enquanto que as outras variáveis não alteram o seu padrão mesmo após a falha na válvula  $S_o$ . A partir da figura 4.44 (a) é possível notar que o controlador  $PI_2$  comanda o fechamento total da válvula  $S_o$  em, aproximadamente,  $t = 3220s$ . O diagnosticador identificou a falha travada-aberta na válvula  $S_o$  após 14s da sua ocorrência, figura 4.45 (a). Nenhuma outra falha foi identificada nesta

simulação.

Em seguida foi realizada a simulação da falha travada-fechada na válvula  $S_o$  para a alimentação em fluxo de golfadas. O resultado das variáveis controladas para essa simulação está ilustrado na figura 4.46. Observa-se que a falha não altera significativamente o comportamento das variáveis controladas, exceto o nível de óleo na câmara de óleo que alcança o valor máximo em 38s, figura 4.46 (a). Em relação à variáveis manipuladas, destaca-se a tentativa do controlador regular o nível ao comandar a abertura da válvula  $S_o$ , figura 4.47. O diagnosticador identificou a falha travada-fechada na válvula  $S_o$  após 24s da sua ocorrência, figura 4.48 (a). Nenhuma outra falha foi identificada nesta simulação.

Foram realizadas simulações de falhas travada-aberta e travada-fechada para as válvulas  $S_{w3}$ ,  $S_g$  e  $S_{o3}$  com a alimentação em fluxo de golfadas. Os resultados dessas foram semelhantes aos apresentados para a alimentação constante. Em todos os casos o diagnosticador foi capaz de detectar a ocorrência da falha, localizar a válvula e identificar a natureza do sinistro em um curto intervalo após a sua ocorrência. Notou-se que a falha é identificada no momento em há uma perda da efetividade do controle, não havendo condições de manter o nível próximo ao *setpoint*.

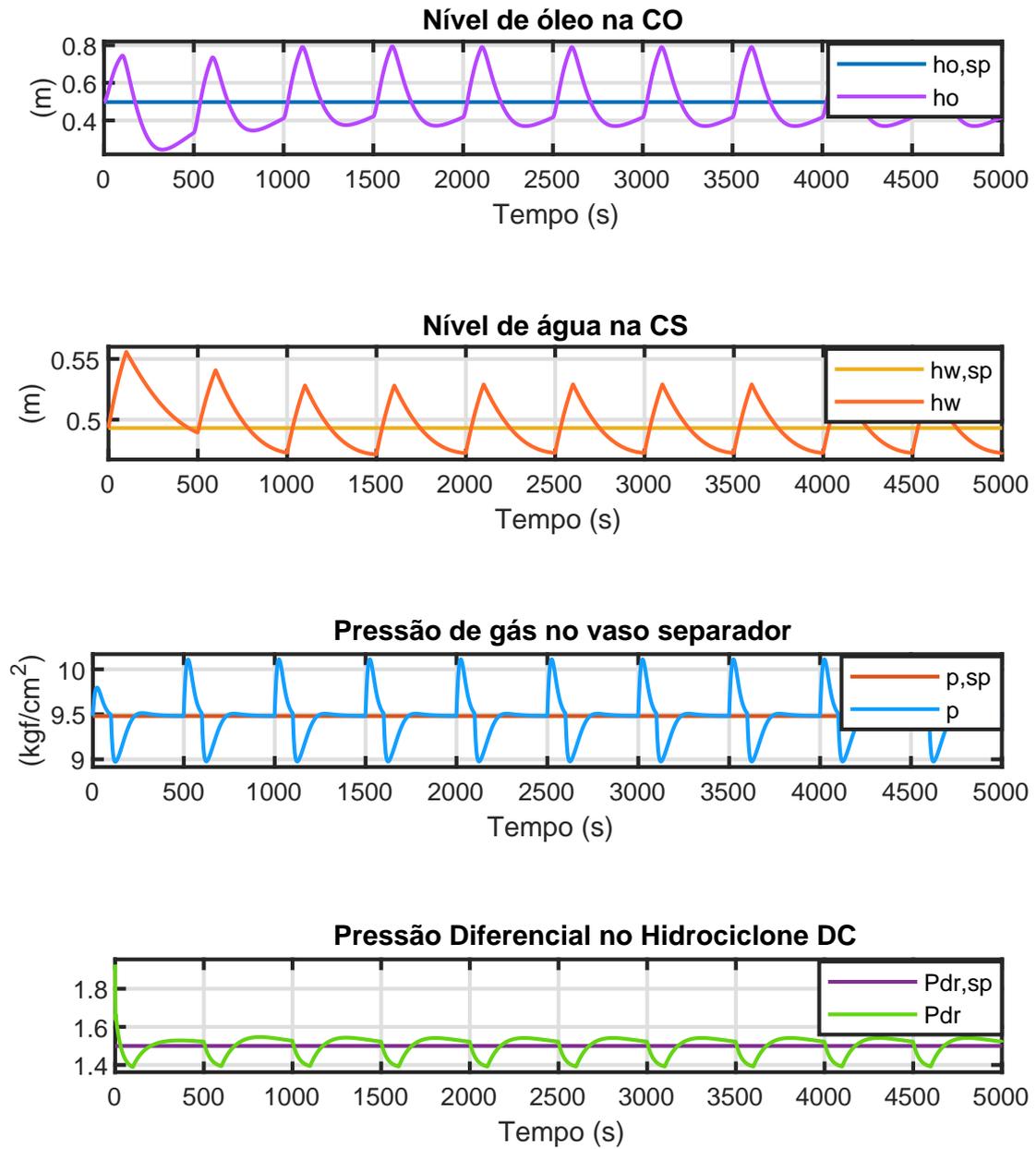


Figura 4.41: Variáveis controladas para alimentação em padrão golfadas.

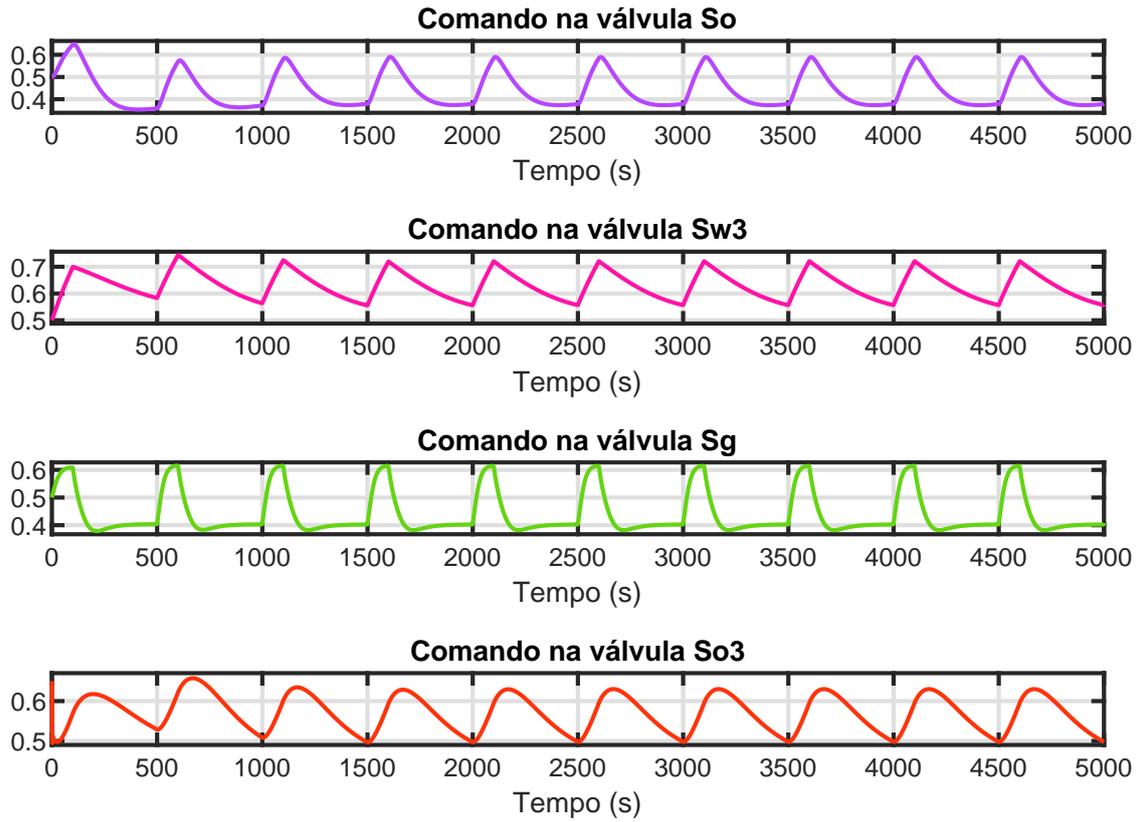


Figura 4.42: Variáveis manipuladas para alimentação em padrão golfadas.

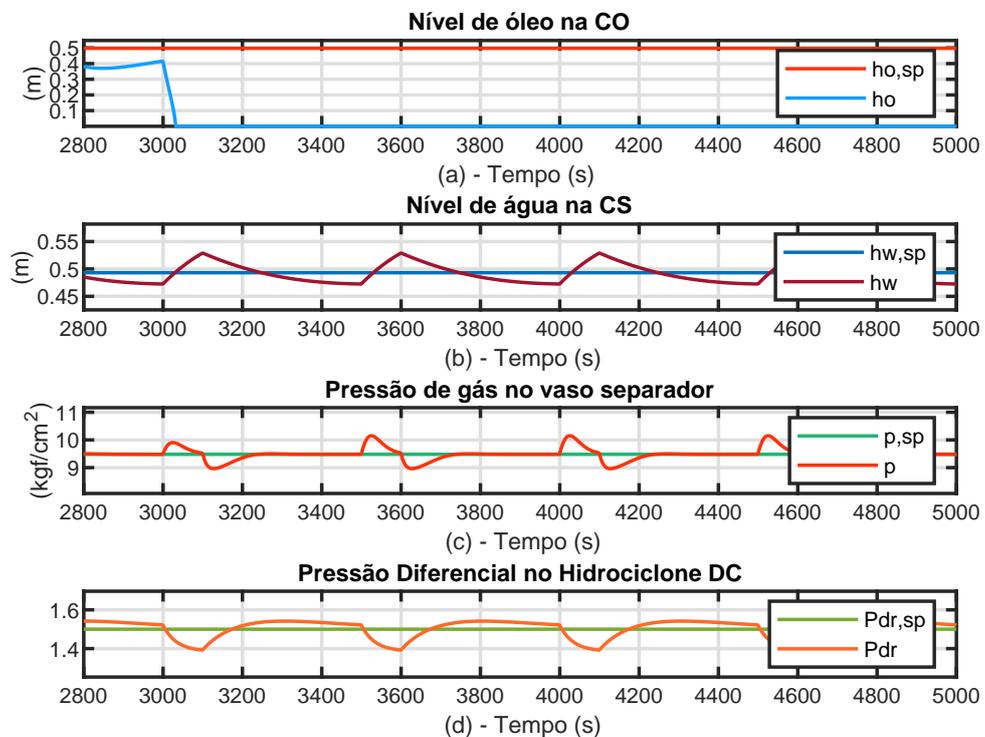


Figura 4.43: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

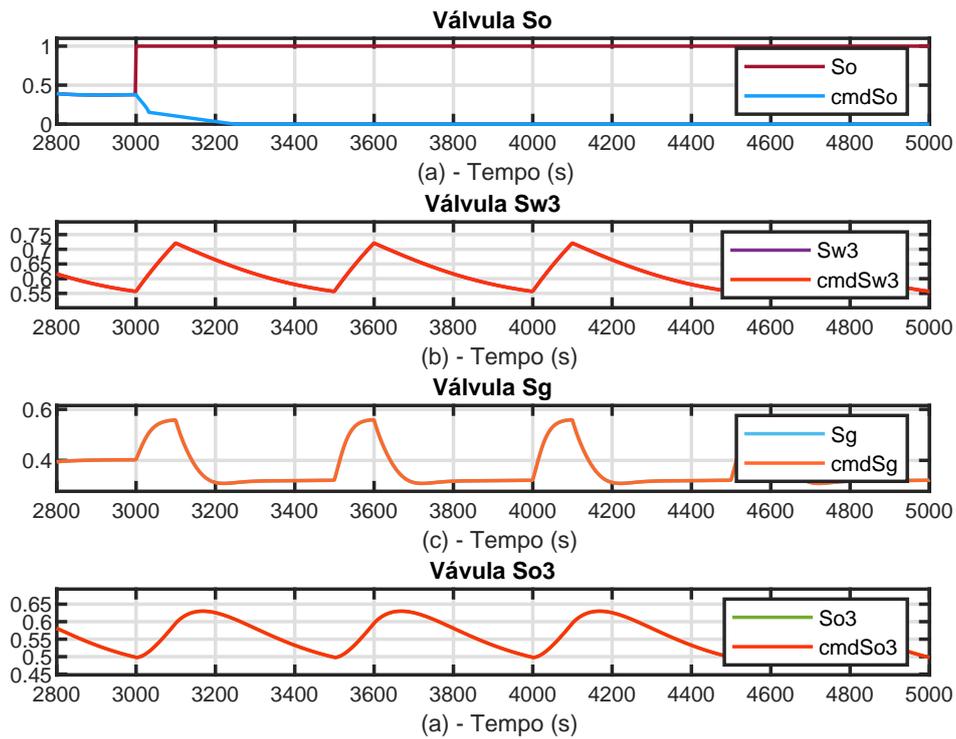


Figura 4.44: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-aberta da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

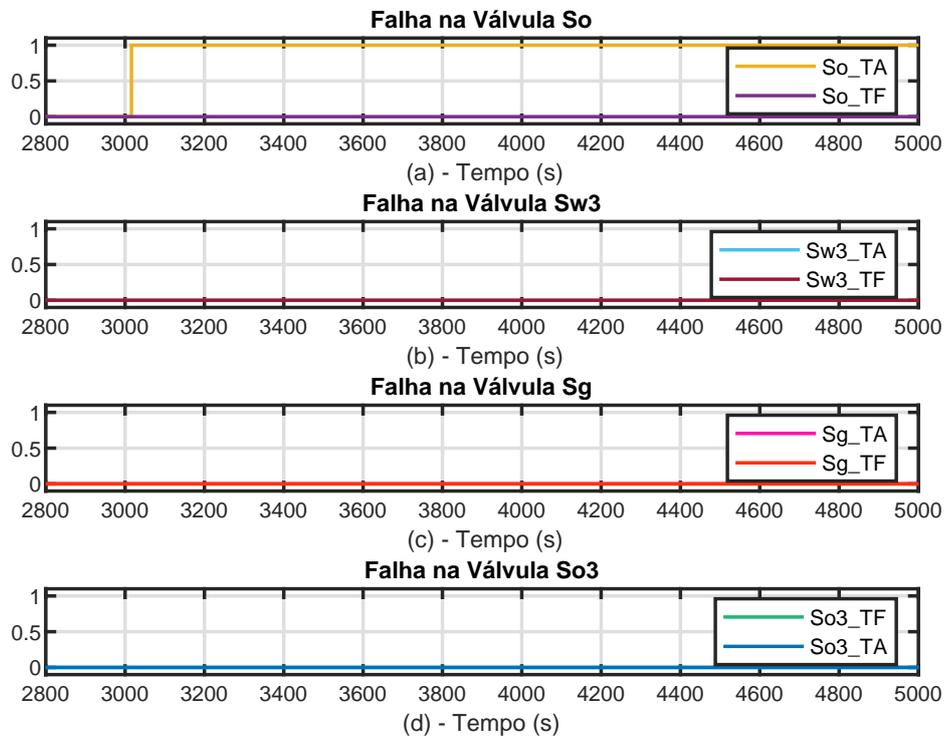


Figura 4.45: Diagnóstico para a falha travada-aberta da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

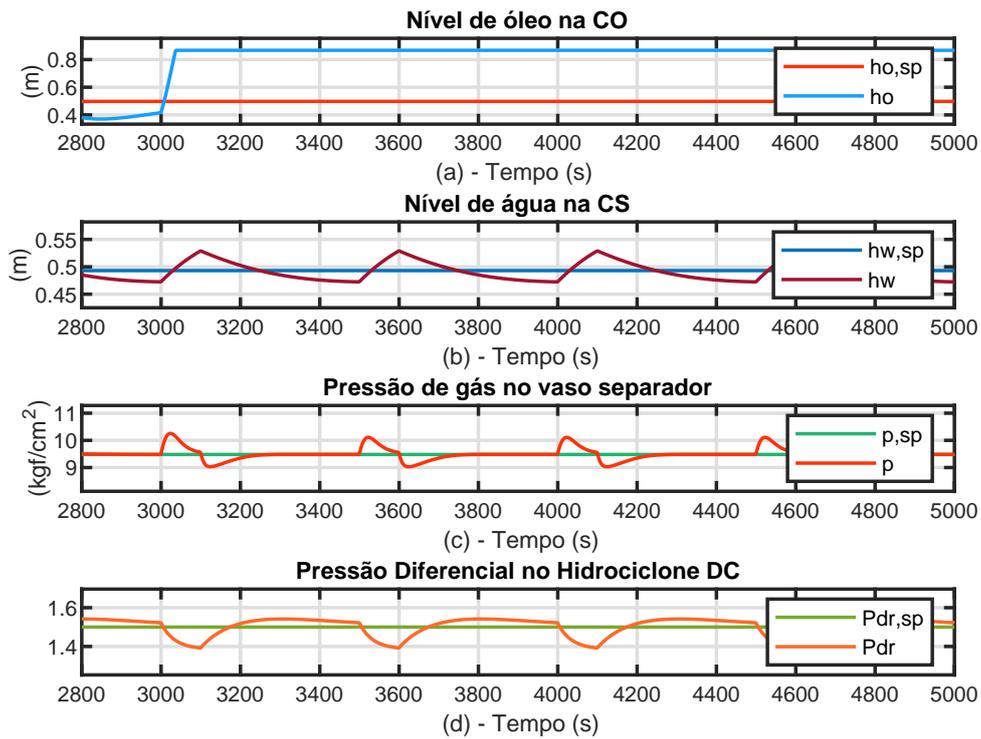


Figura 4.46: Respostas das variáveis controladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

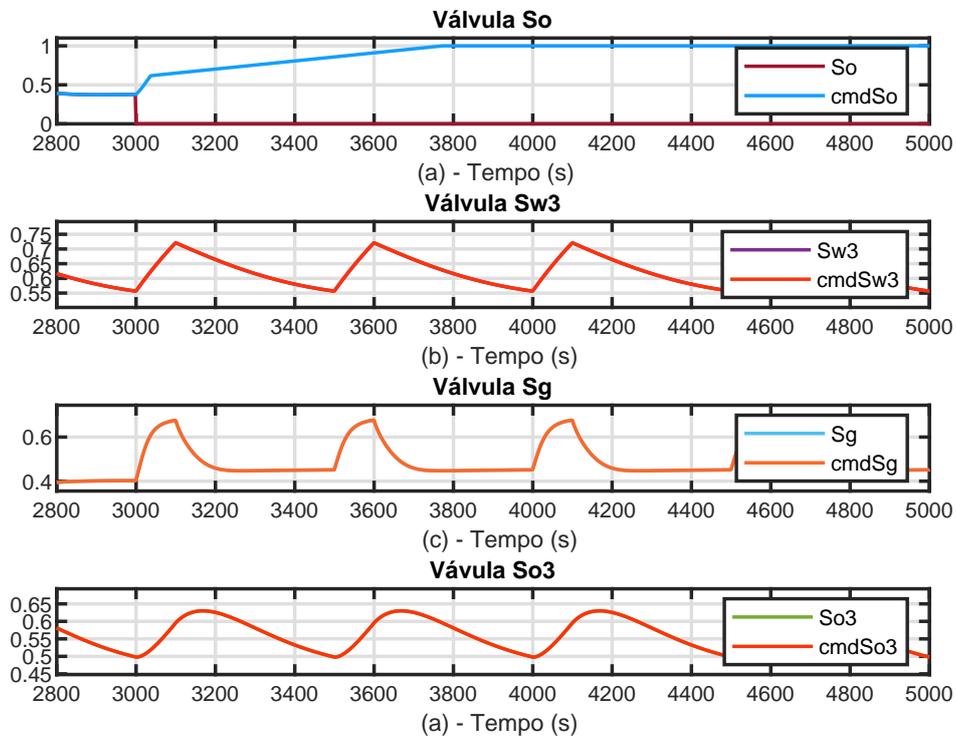


Figura 4.47: Respostas das variáveis manipuladas durante a falha travada-fechada da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

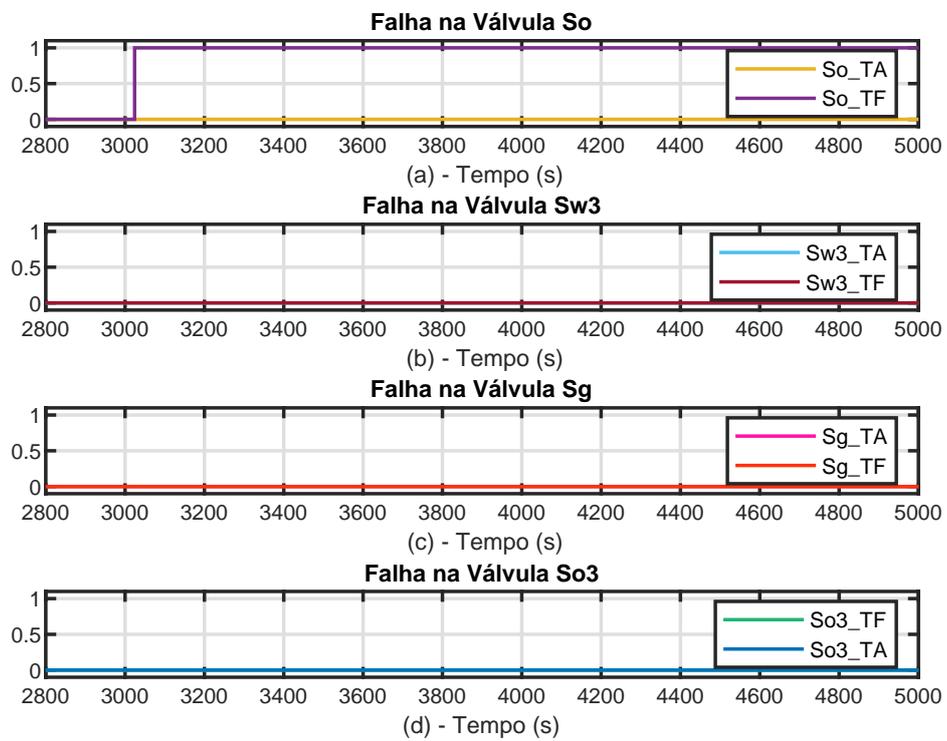


Figura 4.48: Diagnóstico para a falha travada-fechada da válvula  $S_o$  para alimentação em fluxo de golfadas.

## 4.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma Unidade de Separação Trifásica, localizada no campo de Marlim, na Bacia de Campos. Foi descrita a operação da UST, percorrida a modelagem matemática e o seu comportamento integrado foi ilustrado através de simulações. O modelo em SED para o UST foi construído com a aplicação do MS-IEL, em que foi possível notar o potencial desse método para a modelagem de comportamento de sensores e obtenção de um modelo integrado da planta. Por fim, as simulações das falhas mostraram que os diagnosticadores projetados são eficientes e robustos, identificaram as falhas em poucos segundos e antes que as variáveis alcançassem valores críticos para a operação do sistema, mesmo para entradas com padrão de golfadas.

# Capítulo 5

## Conclusões

Nesta dissertação, foi apresentado o método de Mapeamento de Sensores Inspirado na Especificação de Linguagens (MS-IEL) que é um procedimento sistemático para a construção de autômatos que modelam o comportamento de sensores. Como foi mostrado, a principal vantagem de se obter esses autômatos é que o comportamento dos sensores pode ser incluído ao modelo integrado do sistema a partir da operação de composição paralela, mantendo as mesmas características dos eventos dos componentes ativos, o que permite também a escalabilidade da modelagem a partir da inclusão de mais componentes ou sensores ao modelo. O procedimento sistemático apresentado foi utilizado para obter o modelo em SEDs de um sistema realístico de separação trifásica óleo-água-gás, no qual foi possível avaliar o desempenho da diagnose de falhas nas válvulas do processo.

O MS-IEL é fruto do estudo do MS [11] e das aplicações práticas desse método que foram realizadas em outros trabalhos [14, 17]. Notou-se que, apesar do MS inserir as informações dos sensores no modelo completo do sistema, ele realiza a renomeação dos eventos de comando fundindo neles as leituras dos sensores. Essa característica implica em adicionar mais um grau de abstração ao modelo do sistema em SED. As consequências disso são: (i) a perda de precisão na estimação do estado atual do sistema, podendo ocasionar a identificação de falhas que não ocorreram; (ii) necessidade de realizar tratamento analítico dos sinais do sistema para adaptá-los ao conjunto de eventos do modelo em SED, isso dificulta a aplicação direta dos diagnosticadores obtidos ao sistema; (iii) impossibilidade de utilizar o modelo em SED para outras aplicações, como o diagnóstico robusto e a computação da base mínima de sensores para a diagnose.

A partir da aplicação do MS-IEL na diagnose de falhas foi possível notar o seu potencial para a modelagem de SEDs. Os autômatos de sensores, obtidos através da aplicação do MS-IEL, promovem a dissociação entre os eventos de comandos que são enviados à planta e os eventos de leitura. Essa dissociação proporcionou que o refinamento da modelagem pudesse ser realizado através dos autômatos que

modelam as especificações do comportamento do controlador em malha fechada do processo. A extensão do MDS para permitir que um estado do sistema possa ser mapeado com mais de uma informação de um sensor, permite ao MS-IEL a capacidade de modelar autômatos de sensores mesmo nas situações em que houver restrições de informações sobre alguns componentes ou variáveis que interferem no comportamento desse sensor.

A implementação dos diagnosticadores no programa computacional *Simulink*® foi simples e direta, sendo necessária apenas a construção do bloco gerador eventos para transformar as variáveis contínuas em eventos de interesse para o SED. Uma *toolbox* em *Python* para o DESLAB foi implementada nesta dissertação para aplicação do método MS-IEL, fato que simplifica a sua utilização para a modelagem de outros sistemas.

Notou-se que o modelo de SEDs resultante da aplicação do MS-IEL, possui uma quantidade de estados e transições significativamente maior do que o modelo obtido através do MS. Isto se dá porque o MS-IEL executa o desmembramento de estados que foram mapeados com mais de uma saída de determinado sensor e a criação de novos estados nas transições entre os estados com mapeamentos diferentes. Esse crescimento pode ser minimizado com a abordagem da arquitetura descentralizada [32–34] ou com a extensão do MS-IEL para modelagem através redes de Petri, que devido à sua capacidade de modelagem paralela resulta em redução do número de estados.

Por fim, os resultados obtidos na simulações de diagnose de falhas para o processo de separação trifásica água-óleo-gás, mostraram que o diagnosticador obtido funcionou de maneira adequada, identificando as falhas corretamente em tempo hábil para garantir a segurança da instalação e as tomadas de decisões adequadas. O diagnosticador mostrou-se robusto às perturbações na alimentação em padrão de golfadas.

Como trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos para a continuação do trabalho iniciado nesta dissertação, sugere-se:

- Aplicar o MS-IEL para modelar outras aplicações reais, como por exemplo o sistema de propulsão de navios de guerra que é composto por variados componentes, entre eles destacam-se: turbina a gás, motores diesel, engrenagens redutoras, bombas, válvulas e hélice ajustável. Além disso, o método aqui desenvolvido pode ser testado utilizando *benchmarking*;
- Utilizar a capacidade de modelagem do MS-IEL para outros propósitos, como por exemplo o controle supervisório e a computação da base mínima de sensores para a diagnose;
- Estender o MS-IEL para modelagem de redes de Petri e/ou autômatos híbridos;

- Considerar um número maior de falhas no processo de separação da UST; e
- Implementar o sistema de diagnóstico de falhas proposto em escala industrial.

# Referências Bibliográficas

- [1] ZAYTOON, J., LAFORTUNE, S. “Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems”, *Annual Reviews in Control*, v. 37, n. 2, pp. 308–320, 2013.
- [2] RAMÍREZ-TREVIÑO, A., RUIZ-BELTRÁN, E., RIVERA-RANGEL, I., et al. “Online fault diagnosis of discrete event systems. A Petri net-based approach”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 4, n. 1, pp. 31–39, 2007.
- [3] BASILIO, J. C., LAFORTUNE, S. “Robust codiagnosability of discrete event systems”. In: *2009 American Control Conference*, pp. 2202–2209, St. Louis, Missouri, USA, 2009. IEEE.
- [4] CARVALHO, L. K., MOREIRA, M. V., BASILIO, J. C. “Generalized robust diagnosability of discrete event systems”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 44, n. 1, pp. 8737–8742, 2011.
- [5] DEBOUK, R., LAFORTUNE, S., TENEKETZIS, D. “Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems”, *Discrete Event Dynamic Systems*, v. 10, n. 1-2, pp. 33–86, 2000.
- [6] CASSANDRAS, C. G., LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*. 2 ed. New York, Springer, 2008.
- [7] SAMPATH, M. “A hybrid approach to failure diagnosis of industrial systems”. In: *Proceedings of the 2001 American Control Conference.(Cat. No. 01CH37148)*, v. 3, pp. 2077–2082, Arlington, Virginia, USA, 2001. IEEE.
- [8] SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S., et al. “Diagnosability of discrete-event systems”, *IEEE Transactions on automatic control*, v. 40, n. 9, pp. 1555–1575, 1995.
- [9] BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K., MOREIRA, M. V. “Diagnose de falhas em sistemas a eventos discretos modelados por autômatos finitos”, *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 5, pp. 510–533, 2010.

- [10] CARVALHO, L. K., BASILIO, J. C., MOREIRA, M. V. “Diagnose de falhas de sistemas a eventos discretos sujeitos a perdas intermitentes de sensores”. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito, MT, Brasil, 2010.
- [11] SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S., et al. “Failure diagnosis using discrete-event models”, *IEEE transactions on control systems technology*, v. 4, n. 2, pp. 105–124, 1996.
- [12] LIN, F. “Diagnosability of discrete event systems and its applications”, *Discrete Event Dynamic Systems*, v. 4, n. 2, pp. 197–212, 1994.
- [13] RIVERA, M. H. M. *Diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos: uma proposta de aplicação em processos de separação óleo-gás*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [14] NUNES, G. C. *Modelagem e simulação dinâmica de separador trifásico água-óleo-gás*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.
- [15] ZAD, S. H., KWONG, R. H., WONHAM, W. M. “Fault diagnosis in discrete-event systems: Framework and model reduction”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 48, n. 7, pp. 1199–1212, 2003.
- [16] SANTORO, L. P., MOREIRA, M. V., BASILIO, J. C. “Computation of minimal diagnosis bases of Discrete-Event Systems using verifiers”, *Automatica*, v. 77, pp. 93–102, 2017.
- [17] NUNES, C. E. V. *Sistema Inteligente de Suporte Operacional em Sistemas de Tratamento Primário de Petróleo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, 2012.
- [18] HOPCROFT, J. E., MONTWANI, R., ULLMAN, J. *Introduction to Automata theory, languages, and computation*. 3 ed. Boston, Addison Wesley, 2007.
- [19] BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K., MOREIRA, M. V. “Diagnose de falhas em sistemas a eventos discretos modelados por autômatos finitos”, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 21, n. 5, pp. 510–533, 2010.
- [20] MEALY, G. H. “A method for synthesizing sequential circuits”, *The Bell System Technical Journal*, v. 34, n. 5, pp. 1045–1079, 1955.

- [21] VIANA, G. S., BASILIO, J. C. “Codiagnosability of discrete event systems revisited: A new necessary and sufficient condition and its applications”, *Automatica*, v. 101, pp. 354–364, 2019.
- [22] CLAVIJO, L. B., BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K. “DESLAB: A scientific computing program for analysis and synthesis of discrete-event systems”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 45, n. 29, pp. 349–355, 2012.
- [23] “CodigoFonteMS-IEL”. . Disponível em: <<https://github.com/HugoCruzEng/MS-IEL/blob/master/CodigoFonteMS-IEL>>.
- [24] NUNES, G. C. “Modelagem dinâmica do processamento primário de petróleo: conceitos fundamentais e aplicação em controle de processos”. v. 2, Boletim técnico da Produção de Petróleo, pp. 29–47, 2007.
- [25] FILGUEIRAS, N. G. T. *Modelagem, Análise e Controle de um Processo de Separação Óleo/Água*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [26] SILVEIRA, M. A. C. R. *Controle de um Processo de tratamento primário de petróleo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [27] MARTINS, A. E. A. *Diagnose de Falhas de uma Unidade de Separação Trifásica Usando Modelos a Eventos Discretos*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro-Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [28] “MS-IEL/UST”. . Disponível em: <<https://github.com/HugoCruzEng/MS-IEL/edit/master/UST>>.
- [29] “MS-IEL/DeslabToTextFile”. . Disponível em: <<https://github.com/HugoCruzEng/MS-IEL/blob/master/DeslabToTextFile>>.
- [30] “MS-IEL/MatlabTextFileToSimulink”. . Disponível em: <<https://github.com/HugoCruzEng/MS-IEL/blob/master/MatlabTextFileToSimulink>>.
- [31] FIQUEIREDO, A. I., SOTOMAYOR, O. A. Z. *Detecção, diagnóstico e correção de situações anormais em processo de produção de petróleo*. Relatório de pesquisa, PIBIC/CNPq/UFS, 2010.
- [32] CONTANT, O., LAFORTUNE, S., TENEKETZIS, D. “Diagnosability of discrete event systems with modular structure”, *Discrete Event Dynamic Systems*, v. 16, n. 1, pp. 9–37, 2006.

- [33] QIU, W., KUMAR, R. “Decentralized failure diagnosis of discrete event systems”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, v. 36, n. 2, pp. 384–395, 2006.
- [34] WANG, Y., YOO, T.-S., LAFORTUNE, S. “Diagnosis of discrete event systems using decentralized architectures”, *Discrete Event Dynamic Systems*, v. 17, n. 2, pp. 233–263, 2007.

# Apêndice A

## Modelo do Vaso Separador da Unidade de Separação Trifásica

Na modelagem do vaso separador, foi observado o diagrama da figura A.1 para obter o modelo dinâmico não-linear de conservação de massa proposto por [14, 24]. O modelo possui sete variáveis de estados que estão definidas na tabela A.1. Os parâmetros do separador estão descritos na tabela A.2, as variáveis de processo na tabela A.3, as variáveis de entrada e saída na tabela A.4 e as variáveis controladas na tabela A.5. As equações que modelam o comportamento dinâmico do separador estão descritas a seguir:

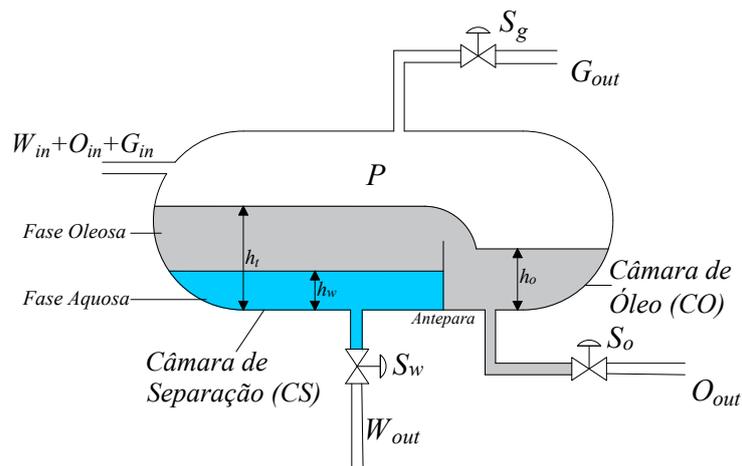


Figura A.1: Vaso separador.

- Equações de estado

$$\frac{dh_t(t)}{dt} = \frac{W_{in}(t) + O_{in}(t) - O_{weir}(t) - W_{out}(t)}{2C_{sc}\sqrt{h_t(t)}(D - h_t(t))} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dh_o(t)}{dt} = \frac{O_{in}(t) - O_{out}(t)}{2C_{oc}\sqrt{h_o(t)}(D - h_o(t))} \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{dh_w(t)}{dt} = \frac{W_{in}(t)(1 - T_{og}E_{osw}) - W_{out}(t)}{2C_{sc}\sqrt{h_w(t)}(D - h_w(t))} + \frac{O_{in}(t)B_{sw}E_{wso}}{2C_{sc}\sqrt{h_w(t)}(D - h_w(t))} \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left( \frac{W_{in}(t) + O_{in}(t) + G_{in}(t)}{V_t - V_{sc}(t) - V_{oc}(t)} - \frac{W_{out}(t) + O_{out}(t) + G_{out}(t)}{V_t - V_{sc}(t) - V_{oc}(t)} \right) p(t) \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{dV_{wsc}(t)}{dt} = O_{in}(t)B_{sw}(1 - E_{osw}) - \frac{O_{weir}(t)V_{wsc}(t)}{V_{sc}(t) - V_{wps}(t)} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{dV_{osc}(t)}{dt} = W_{in}(t)T_{og}(1 - E_{wso}) - \frac{O_{out}(t)V_{osc}(t)}{V_{wps}(t)} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{dV_{woc}(t)}{dt} = \frac{O_{weir}(t)V_{wsc}}{V_{sc}(t) - V_{wps}(t)} - \frac{O_{out}(t)V_{woc}(t)}{V_{oc}(t)} \quad (\text{A.7})$$

- Equações de saída

$$W_{out}(t) = C_{wm}S_w(t) \left( \frac{d_w(p(t) - p_{ds})}{(4,158\rho_{op}(t))^2} + \frac{(\gamma_w h_w(t) + \gamma_o(h_t(t) - h_w(t)))10^{-4}}{(4,158\rho_{op}(t))^2} \right)^{1/2} \quad (\text{A.8})$$

$$O_{out}(t) = \frac{C_{om}S_o(t)\sqrt{d_o(p(t) - p_{ds}) + \gamma_o \cdot 10^{-4} \cdot h_o(t)}}{4,158\rho_{op}(t)} \quad (\text{A.9})$$

$$G_{out}(t) = \frac{C_{gm}S_g(t)RT}{169,92p(t)M_g} (d_g(p(t) - p_{agv}) \times (p(t) + p_{agv}))^{1/2} \quad (\text{A.10})$$

- Equações da dinâmica do processo

$$V_{sc}(t) = \frac{C_{sc}D^2}{4} \left\{ a \cos\left(1 - 2\frac{h_t(t)}{D}\right) - \sin\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_t(t)}{D}\right)\right] \cos\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_t(t)}{D}\right)\right] \right\} \quad (\text{A.11})$$

$$V_{oc}(t) = \frac{C_{oc}D^2}{4} \left\{ a \cos\left(1 - 2\frac{h_o(t)}{D}\right) - \sin\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_o(t)}{D}\right)\right] \cos\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_o(t)}{D}\right)\right] \right\} \quad (\text{A.12})$$

$$V_{wps}(t) = \frac{C_{sc}D^2}{4} \left\{ a \cos\left(1 - 2\frac{h_w(t)}{D}\right) - \sin\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_w(t)}{D}\right)\right] \cos\left[a \cos\left(1 - 2\frac{h_w(t)}{D}\right)\right] \right\} \quad (\text{A.13})$$

$$\rho_{op}(t) = \rho_o \left( 1 - \frac{V_{wsc}(t)}{V_{sc}(t) - V_{wps}(t)} \right) + \rho_w \frac{V_{wsc}(t)}{V_{sc}(t) - V_{wps}(t)} \quad (\text{A.14})$$

$$\rho_{wp}(t) = \rho_w \left( 1 - \frac{V_{osc}(t)}{V_{wps}(t)} \right) + \rho_o \frac{V_{osc}(t)}{V_{wps}(t)} \quad (\text{A.15})$$

$$O_{weir}(t) = \frac{24,88 \cdot \sqrt{2g}}{60} [C_{weir} - 0,2(h_t(t) - h_{weir})] \times (h_t(t) - h_{weir})^{1,5} \quad (\text{A.16})$$

Tabela A.1: Variáveis de estado do separador.

Variável	Descrição
$h_t(t)$	Nível total da mistura na CS
$h_o(t)$	Nível do óleo na CO
$h_w(t)$	Nível da água na CS
$p(t)$	Pressão de Gás no separador
$V_{wsc}(t)$	Volume de água na fase oleosa na CS
$V_{osc}(t)$	Volume de óleo na fase aquosa na CS
$V_{woc}(t)$	Volume de água na fase oleosa na CO

Tabela A.2: Parâmetros do separador.

Parâmetro	Descrição	Valor
$C_{sc}$	Comprimento da CS	4,4 <i>m</i>
$C_{oc}$	Comprimento da CO	1,0 <i>m</i>
$D$	Diâmetro do Separador	1,8 <i>m</i>
$h_{weir}$	Altura da barreira	0,867 <i>m</i>
$C_{weir}$	Comprimento da barreira	0,9 <i>m</i>
$\rho_w$	Massa específica da água	965 <i>kg/m</i> <sup>3</sup>
$\rho_o$	Massa específica do óleo	855 <i>kg/m</i> <sup>3</sup>
$d_o$	Densidade específica do óleo	0,965 <i>kg/m</i> <sup>3</sup>
$d_g$	Densidade específica do gás	0,565 <i>kg/m</i> <sup>3</sup>
$V_t$	Volume total do separador	16,0315 <i>m</i> <sup>3</sup>
$g$	Aceleração da gravidade	9,80665 <i>m/s</i> <sup>2</sup>
$C_{om}$	Coefficiente de descarga máxima da válvula de óleo	44,4
$C_{wm}$	Coefficiente de descarga máxima da válvula de água	36,7
$C_{gm}$	Coefficiente de descarga máxima da válvula de gás	74,05
$p_{ds}$	Pressão a jusante das válvulas de óleo e de água	1 <i>kgf/cm</i> <sup>2</sup>
$p_{agv}$	Pressão a jusante da válvula de gás	8,5 <i>kgf/cm</i> <sup>2</sup>
$\gamma_o$	Peso específico do óleo	855 <i>kgf/m</i> <sup>3</sup>
$\gamma_w$	Peso específico da água	965 <i>kgf/m</i> <sup>3</sup>
$B_{sw}$	Concentração de água na fase oleosa	0,1
$T_{og}$	Concentração de óleo na fase aquosa	0,13
$E_{osw}$	Eficiência de separação do óleo da fase aquosa	0,9994
$E_{wso}$	Eficiência de separação da água da fase oleosa	0,9292
$M_g$	Peso molecular do gás	16,48 <i>kgf/m</i> <sup>3</sup>
$R$	Constante universal dos gases	0,082 $\frac{atm.l}{mol.K}$
$T$	Temperatura da carga	360 <i>K</i>

Tabela A.3: Variáveis do processo.

Variável	Descrição
$V_{sc}(t)$	Volume da mistura líquida na CS
$V_{oc}(t)$	Volume da fase aquosa na CO
$V_g(t)$	Volume de gás no separador
$V_{wps}(t)$	Volume da fase aquosa na câmara de separação
$\rho_{op}(t)$	Massa específica da fase oleosa
$\rho_{wp}(t)$	Massa específica da fase aquosa
$O_{weir}(t)$	Vazão de óleo sobre a antepara

Tabela A.4: Variáveis de entrada e saída do separador.

Variável	Descrição	Condição inicial
$W_{in}(t)$	Vazão de entrada de água	0,0133 $m^3/s$
$O_{in}(t)$	Vazão de entrada de óleo	0,0167 $m^3/s$
$G_{in}(t)$	Vazão de entrada de gás	0,1300 $m^3/s$
$W_{out}(t)$	Vazão de saída de água da CS	0,0133 $m^3/s$
$O_{out}(t)$	Vazão de saída de óleo da CO	0,0167 $m^3/s$
$G_{out}(t)$	Vazão de saída de gás do separador	0,1300 $m^3/s$

Tabela A.5: Variáveis de controle do separador.

Variável	Descrição
$S_o(t)$	Abertura da válvula de óleo
$S_w(t)$	Abertura da válvula de água
$S_g(t)$	Abertura da válvula de gás

# Apêndice B

## Modelo do Hidrociclone da Unidade de Separação Trifásica

O hidrociclone modelado está mostrado na figura B.1. O conhecimento sobre a perda de carga nas linhas acima e abaixo das saídas do hidrociclones desempenham um papel crucial no equacionamento do fluxo, como segue nas equações para  $i = 1, 2, 3$ .

$$\Delta P_{o_i}(t) = \alpha_1 W_{o_i}(t) \quad (\text{B.1})$$

$$\Delta P_{w_3}(t) = \alpha_2 W_{w_3}(t) \quad (\text{B.2})$$

$$W_{o_i}(t) = \frac{C_{v_{m_0}} S_{o_i}(t)}{\rho_{op}(t) 4,158} \sqrt{d_o (P_{w_{i-1}} - \Delta P_{o_i}(t) - P_{o_i})} \quad (\text{B.3})$$

$$W_{w_3}(t) = \frac{C_{v_{m_w}} S_{w_3}(t)}{\rho_{wp}(t) 4,158} \sqrt{d_w (P_{w_2} - \Delta P_{w_3}(t) - P_{w_3})} \quad (\text{B.4})$$

$$W_{w_2}(t) = W_{o_3}(t) + W_{w_3}(t) \quad (\text{B.5})$$

$$W_{w_1}(t) = W_{o_2}(t) + W_{w_2}(t) \quad (\text{B.6})$$

$$P_{dr_3} = \frac{\Delta P_{o_3}}{\Delta P_{w_3}} \quad (\text{B.7})$$

A descrição das variáveis e os valores dos parâmetros do hidrociclone são dados nas tabelas B.1 e B.2, respectivamente.

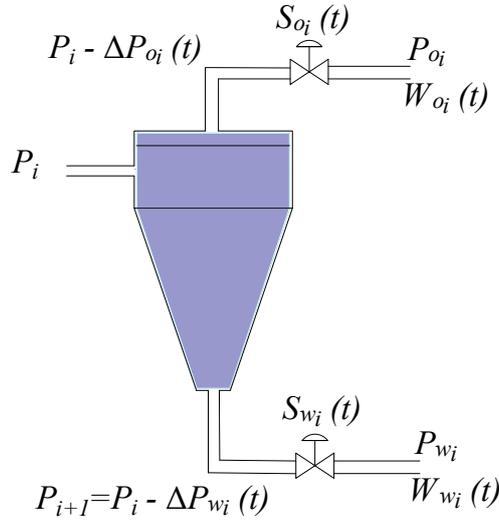


Figura B.1: Modelo do  $i$  – ésimo hidrociclone.

Tabela B.1: Variáveis do hidrociclone.

Variável	Descrição
$W_o(t)$	Vazão de óleo na linha de topo do hidrociclone em $[m^3/s]$
$W_u(t)$	Vazão de água na linha de fundo do hidrociclone em $[m^3/s]$
$\Delta P_o(t)$	Diferencial de pressão entre alimentação e descarga no topo em $[kgf/cm^2]$
$\Delta P_w(t)$	Diferencial de pressão entre alimentação e descarga no fundo em $[kgf/cm^2]$

Tabela B.2: Parâmetros da série de hidrociclones BOW, PDC e DC.

Variável	Descrição	Valor
$C_{vm_o}$	Coefficiente de descarga máximo da válvula de topo	1,85
$C_{vm_w}$	Coefficiente de descarga máximo da válvula de fundo	45
$\alpha_1$	Parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga	7000
$\alpha_2$	Parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga	150
$P_{w_0}$	Pressão na alimentação do hidrociclone BOW	10 $kgf/cm^2$
$P_{o_1}$	Pressão na descarga da linha de óleo do BOW	7 $kgf/cm^2$
$P_{w_1}$	Pressão na descarga da linha de água do BOW	7 $kgf/cm^2$
$P_{o_2}$	Pressão na descarga da linha de óleo do PDC	5 $kgf/cm^2$
$P_{w_2}$	Pressão na descarga da linha de água do PDC	5 $kgf/cm^2$
$P_{o_3}$	Pressão na descarga da linha de óleo do DC	1 $kgf/cm^2$
$P_{w_3}$	Pressão na descarga da linha de água do DC	1 $kgf/cm^2$

# Apêndice C

## Modelo Integrado da Unidade de Separação Trifásica

A integração do modelo da figura 4.2 necessita das hipóteses descritas a seguir.

**H1** As condições iniciais são dadas pelos valores da tabela A.4 e o valor de *steady-state* para as essas entradas são dadas na tabela C.1. Os valores iniciais de abertura das válvulas são descritos na tabela C.2, em que 0 significa que a válvula está totalmente fechada e 1 que a válvula está totalmente aberta.

**H2** A vazão de saída da água  $W_{out}(t)$  a partir da CS é dada pela soma das saídas dos três hidrociclones:

$$W_{out}(t) = W_{o1}(t) + W_{o2}(t) + W_{o3}(t) + W_{w3}(t) \quad (C.1)$$

Tabela C.1: Valores de *setpoint* das malhas de controle

Parâmetro	Setpoint
$h_{o,sp}$	0,4976 m
$h_{w,sp}$	0,4931 m
$p_{sp}$	9,4806 kgf/cm <sup>2</sup>
$P_{dr,sp}$	1,25

Acrescenta-se à hipótese **H1** o fato que o sistema de diagnose de falhas só começa a trabalhar depois que o sistema encontra-se no *steady-state*. Já a hipótese **H2** supõe que as válvulas  $S_w$ ,  $S_{w_1}$  e  $S_{w_2}$  estão completamente abertas, o que implica que a equação A.8, na simulação do comportamento do sistema, é substituída pela equação C.1. O tempo de amostragem  $T_s = 2s$  foi encontrado de acordo com o comportamento dinâmico do sistema.

Tabela C.2: Variáveis manipuladas do sistema de controle do separador

Variável	Descrição	Condição Inicial [0,1]
$S_o(t)$	Abertura da válvula de óleo do separador	0,5
$S_{o_1}(t)$	Abertura da válvula de óleo do BOW	0,5
$S_{o_2}(t)$	Abertura da válvula de óleo do PDC	0,5
$S_{o_3}(t)$	Abertura da válvula de óleo do DC	0,5
$S_{w_3}(t)$	Abertura da válvula de água do DC	0,5
$S_g(t)$	Abertura da válvula de gás	0,5

# Apêndice D

## Controladores $PI$ da Unidade de Separação Trifásica

Os quatro controladores  $PI$  usados nesse sistema possuem a seguinte estrutura, para  $i = 1, 2, 3, 4$ :

$$u_i(k) = u_i(k-1) + k_{c_i} e_i(k) + k_{c_i} \left( \frac{T_s - \tau_i}{\tau_i} \right) e_i(k-1) \quad (D.1)$$

em que  $K_{c_i}$  é o ganho proporcional para a malha  $i$ ,  $\tau_i$  é a constante de tempo integral da malha  $i$  e  $u_i$  e  $e_i$  são, respectivamente, a saída do controlador e o sinal de erro da malha  $i$  dados pelas equações a seguir.

$$\begin{aligned} u_1(t) &= S_g(t), \\ u_2(t) &= S_o(t), \\ u_3(t) &= S_{o_1}(t) = S_{o_2}(t) = S_{w_3}(t) \\ u_4(t) &= S_{o_3}(t) \end{aligned} \quad (D.2)$$

$$\begin{aligned} e_1(t) &= p_{sp} - p(t), \\ e_2(t) &= h_{o,sp} - h_o(t), \\ e_3(t) &= h_{w,sp} - h_w(t), \\ e_4(t) &= P_{dr,sp} - P_{dr}(t). \end{aligned}$$

Os parâmetros  $p_{sp}$ ,  $h_{o,sp}$ ,  $h_{w,sp}$  e  $P_{dr,sp}$  são os valores dos *setpoints* da pressão interna do separador, do nível de óleo na CO, do nível de água na CS e da razão da pressão diferencial no hidrociclone DC, respectivamente. Os valores de referência das variáveis controladas são listados na tabela C.1 e as variáveis manipuladas são descritas na tabela C.2. Os parâmetros dos controladores foram obtidos por [17, 25, 26] e são listados na tabela D.1.

Tabela D.1: Parâmetros dos controladores PI

Controlador	$k_{c_i}$	$\tau_i$
$PI_1$	-0,096	14,6667
$PI_2$	-5,156	366,228
$PI_3$	-2,7749	366,228
$PI_4$	0,1	8

# Apêndice E

## Autômato Desmembrado ( $G_{db_1}$ )

O autômato desmembrado  $G_{db_1}$  está representado na tabela E.1, em que seu estado inicial é  $Vi_{0new}$ .

Tabela E.1: Autômato Desmembrado  $G_{db_1}$

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
Vo	Ot	Vo	Vo	Ct	Vc
Vo	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	Vo	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$
Vo	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	Vo	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
Vo	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	Vo	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
Vo	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	Vo	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
Vc	Ot	Vo	Vc	Ct	Vc
Vc	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	Vc	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$
Vc	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	Vc	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
Vc	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	Vc	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
Vc	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	Vc	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vi, Sar \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vi, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sar \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sar \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sar \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$	$\langle Vi, Sar \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sar \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$	$Vi_{0new}$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sar \rangle$
$Vi_{0new}$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sad \rangle$	$Vi_{0new}$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbd \rangle$
$Vi_{0new}$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	Ot	Vo
$\langle Vi, Sad \rangle$	Ct	Vc	$\langle Vi, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbr \rangle$

Continua na próxima página

Tabela E.1 –Autômato Desmembrado  $G_{db_1}$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
$\langle Vi, Sad \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$
$\langle Vi, Sad \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
$\langle Vi, Sad \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sad \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	$\langle Vi, Sad \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vi, Sbd \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vi, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sar \rangle$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sad \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$	$\langle Vi, Sbd \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sbd \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	Ot	Vo
$\langle Vi, Sbr \rangle$	Ct	Vc	$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sar \rangle$
$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vi, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sbr \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$
$\langle Vi, Sbr \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
$\langle Vi, Sbr \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
$\langle Vi, Sbr \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	$\langle Vi, Sbr \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sar \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vpoc, Sar \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$
$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sar \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
$\langle Vpoc, Sar \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sad \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vpoc, Sad \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$
$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sad \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
$\langle Vpoc, Sad \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$
$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$
$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sar \rangle$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$	tf	$\langle Vtf, Sbr \rangle$
$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	Ot	Vo	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	Ct	Vc
$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	Poc	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sar \rangle$
$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	$\varepsilon$	$\langle Vpoc, Sbd \rangle$
$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	ta	$\langle Vta, Sad \rangle$	$\langle Vpoc, Sbr \rangle$	ta	$\langle Vta, Sbd \rangle$

Continua na próxima página

Tabela E.1 –Autômato Desmembrado  $G_{db_1}$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
$\langle \text{Vpoc}, \text{Sbr} \rangle$	tf	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	$\langle \text{Vpoc}, \text{Sbr} \rangle$	tf	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$
$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	Ct	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	Ot	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$
$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	Poc	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$	$\varepsilon$	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$
$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	Ct	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	Ot	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$
$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	Poc	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	$\langle \text{Vta}, \text{Sbd} \rangle$	$\varepsilon$	$\langle \text{Vta}, \text{Sad} \rangle$
$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	Ct	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	Ot	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$
$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	Poc	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$	$\varepsilon$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$
$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	Ct	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	Ot	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$
$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	Poc	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sbr} \rangle$	$\varepsilon$	$\langle \text{Vtf}, \text{Sar} \rangle$

# Apêndice F

## Autômato Sensor ( $G_s$ )

O autômato  $G_s$  teve seus estados renomeados e está representado na tabela F.1, em que seu estado inicial é 66.

Tabela F.1: Autômato Sensor  $G_s$

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
1	Sbr	112	1	Sar	43
2	Ct	112	2	Poc	112
2	Sbr	112	2	Ot	112
2	Sar	96	3	Sar	96
4	Sad	98	4	Ct	29
4	tf	73	4	Poc	95
4	Ot	88	4	ta	34
4	Sbr	7	4	Sbd	78
5	Sbr	110	5	Sar	96
6	Sar	96	6	Sbr	74
7	Sad	98	7	Ct	58
7	tf	9	7	Sar	4
7	Poc	37	7	Ot	69
7	ta	45	7	Sbd	78
8	Sbr	112	8	Sar	43
9	Ct	112	9	Poc	112
9	Sbr	112	9	Ot	112
9	Sar	64	10	Sad	106
10	Ct	58	10	tf	72
10	Sar	41	10	Poc	10
10	Ot	21	10	ta	87

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
10	Sbd	85	11	Sbd	105
11	Poc	11	11	Ct	11
11	Ot	11	12	Sad	28
12	Sbd	105	13	Sar	84
13	Sbr	113	14	Sbr	2
14	Sar	67	15	Ct	82
15	tf	118	15	Sar	41
15	Poc	106	15	Ot	30
15	ta	114	15	Sbr	10
15	Sbd	85	16	Sad	11
16	Ct	11	16	Poc	11
16	Ot	11	16	Sbd	105
17	Sad	11	17	Sbd	105
18	Sar	96	18	Sbr	112
19	Sad	11	19	Ct	11
19	Poc	11	19	Ot	11
19	Sbd	108	20	Sad	11
20	Ct	105	20	Poc	105
20	Ot	105	20	Sbd	105
21	Sad	30	21	tf	55
21	ta	25	22	Sad	11
22	Ct	11	22	Poc	11
22	Ot	11	22	Sbd	105
23	Sar	3	23	Sbr	112
24	Sad	30	24	tf	89
24	ta	47	25	Sad	11
25	Sbd	102	26	Sbr	58
26	ta	42	26	tf	27
27	Sbr	112	27	Sar	96
28	Sad	11	29	Sbr	58
29	ta	33	29	tf	18
30	Ct	26	30	tf	38
30	Poc	15	30	Ot	30
30	ta	65	31	Poc	112
31	Ct	112	31	Ot	112
31	Sar	96	32	Sad	11

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
32	Sbd	102	33	Sad	28
33	Sbd	79	34	Sad	11
34	Sbd	105	35	Sad	91
35	Ct	105	35	Poc	105
35	Ot	105	35	Sbd	105
36	Sar	84	36	Sbr	113
37	Sad	106	37	Ct	58
37	tf	80	37	Sar	41
37	Poc	10	37	Ot	21
37	ta	117	37	Sbd	85
38	Sbr	112	38	Sar	96
39	Sad	11	39	Sbd	105
40	Ot	96	40	Poc	96
40	Ct	96	40	Sbr	112
41	Sad	106	41	Ct	81
41	tf	40	41	Poc	41
41	Ot	116	41	ta	97
41	Sbr	10	41	Sbd	85
42	Sbd	105	42	Poc	11
42	Ct	11	42	Ot	11
43	Sar	96	44	Sad	11
44	Ct	11	44	Poc	11
44	Ot	11	44	Sbd	108
45	Sad	16	45	Sbd	92
46	Sbr	112	46	Sar	3
47	Sad	11	47	Sbd	105
48	Sbr	52	48	Sar	96
49	Sad	93	49	Ct	105
49	Poc	105	49	Ot	105
49	Sbd	105	50	Sad	28
50	Sbd	105	51	Sad	30
51	tf	46	51	ta	99
52	Ct	112	52	Poc	112
52	Sbr	112	52	Ot	112
52	Sar	96	53	Ct	82
53	tf	61	53	Sar	41

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
53	Poc	106	53	Ot	30
53	ta	19	53	Sbr	10
53	Sbd	85	54	Sad	11
54	Sbd	79	55	Sar	3
55	Sbr	112	56	Sad	30
56	tf	101	56	ta	17
57	Sad	11	57	Sbd	79
58	Ct	58	58	tf	31
58	Poc	111	58	Ot	51
58	ta	119	59	Sar	96
59	Sbr	74	60	Sbr	110
60	Sar	96	61	Sbr	52
61	Sar	96	62	Sbr	58
62	ta	12	62	tf	107
63	Sad	93	63	Sbd	20
64	Ct	96	64	Sar	96
64	Poc	96	64	Ot	96
64	Sbr	112	65	Sbd	105
65	Poc	11	65	Ct	11
65	Ot	11	66	Sad	98
66	tf	6	66	Sar	4
66	Sbr	7	66	ta	63
66	Sbd	78	67	Ct	96
67	Sar	96	67	Poc	96
67	Ot	96	67	Sbr	112
68	Sbr	58	68	ta	50
68	tf	86	69	Sad	30
69	tf	23	69	ta	90
70	Ct	112	70	Poc	112
70	Sbr	112	70	Ot	112
70	Sar	77	71	Ot	96
71	Poc	96	71	Ct	96
71	Sbr	112	72	Ct	112
72	Poc	112	72	Sbr	112
72	Ot	112	72	Sar	77
73	Ot	96	73	Poc	96

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
73	Ct	96	73	Sbr	112
74	Ct	112	74	Poc	112
74	Sbr	112	74	Ot	112
74	Sar	96	75	Sad	106
75	Ct	62	75	tf	13
75	Sar	41	75	Poc	85
75	Ot	24	75	ta	76
75	Sbr	10	76	Sad	91
76	Ct	105	76	Poc	105
76	Ot	105	76	Sbd	105
77	Ct	96	77	Sar	96
77	Poc	96	77	Ot	96
77	Sbr	112	78	Sad	98
78	Ct	68	78	tf	14
78	Sar	4	78	Poc	75
78	Ot	56	78	ta	49
78	Sbr	7	79	Sbd	105
80	Ct	112	80	Poc	112
80	Sbr	112	80	Ot	112
80	Sar	77	81	Sbr	58
81	ta	103	81	tf	104
82	Sbr	58	82	ta	57
82	tf	8	83	Sad	11
83	Ct	105	83	Poc	105
83	Ot	105	83	Sbd	105
84	Ct	96	84	Sar	96
84	Poc	96	84	Ot	96
84	Sbr	112	85	Sad	106
85	Ct	62	85	tf	36
85	Sar	41	85	Poc	85
85	Ot	24	85	ta	35
85	Sbr	10	86	Sbr	112
86	Sar	43	87	Sad	22
87	Sbd	83	88	Sad	30
88	tf	60	88	ta	32
89	Sbr	110	89	Sar	3

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
90	Sad	11	90	Sbd	102
91	Sad	11	91	Ct	11
91	Poc	11	91	Ot	11
91	Sbd	105	92	Sad	11
92	Ct	105	92	Poc	105
92	Ot	105	92	Sbd	105
93	Sad	11	93	Ct	11
93	Poc	11	93	Ot	11
93	Sbd	105	94	Sad	22
94	Sbd	83	95	Sad	106
95	Ct	81	95	tf	71
95	Poc	41	95	Ot	116
95	ta	39	95	Sbr	10
95	Sbd	85	96	Sbr	112
96	Poc	96	96	Ct	96
96	Ot	96	97	Sad	11
97	Sbd	105	98	Ct	109
98	tf	59	98	Sar	4
98	Poc	53	98	Ot	30
98	ta	115	98	Sbr	7
98	Sbd	78	99	Sad	11
99	Sbd	102	100	Sad	11
100	Sbd	102	101	Sar	3
101	Sbr	110	102	Sbd	105
103	Sad	28	103	Sbd	79
104	Sbr	112	104	Sar	96
105	Sad	11	105	Poc	105
105	Ct	105	105	Ot	105
106	Ct	82	106	tf	48
106	Sar	41	106	Poc	106
106	Ot	30	106	ta	44
106	Sbr	10	106	Sbd	85
107	Sar	43	107	Sbr	112
108	Sad	11	108	Ct	105
108	Poc	105	108	Ot	105
108	Sbd	105	109	Sbr	58

Continua na próxima página

Tabela F.1 –Autômato Sensor  $G_s$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
109	ta	54	109	tf	1
110	Sbr	112	111	Sad	106
111	Ct	58	111	tf	70
111	Sar	41	111	Poc	10
111	Ot	21	111	ta	94
111	Sbd	85	112	Poc	112
112	Ct	112	112	Ot	112
112	Sar	96	113	Ct	112
113	Poc	112	113	Sbr	112
113	Ot	112	113	Sar	96
114	Sad	11	114	Ct	11
114	Poc	11	114	Ot	11
114	Sbd	108	115	Sad	11
115	Ct	11	115	Poc	11
115	Ot	11	115	Sbd	20
116	Sad	30	116	tf	5
116	ta	100	117	Sad	22
117	Sbd	83	118	Sbr	52
118	Sar	96	119	Sad	11
119	Sbd	105	-	-	-

# Apêndice G

## Autômato do Controlador $G_c$

O autômato do controlador  $G_c$  da UST está representado na tabela G.1, em que seu estado inicial é  $(1, 1, 1)$ .

Tabela G.1: Autômato Controlador  $G_c$

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
(1, 2, 1)	Sbr	(1, 2, 2)	(1, 2, 1)	Sad	(1, 2, 2)
(1, 2, 1)	Sbd	(2, 2, 2)	(2, 2, 2)	Ot	(2, 3, 1)
(2, 2, 2)	Ct	(3, 2, 1)	(2, 2, 2)	Poc	(2, 2, 1)
(3, 1, 2)	Ct	(3, 1, 1)	(3, 1, 2)	Poc	(3, 1, 1)
(3, 1, 1)	Sar	(3, 2, 2)	(3, 1, 1)	Sbr	(3, 1, 2)
(3, 1, 1)	Sad	(3, 1, 2)	(3, 1, 1)	Sbd	(2, 1, 2)
(1, 3, 2)	Ot	(1, 3, 1)	(1, 3, 2)	Poc	(1, 3, 1)
(2, 3, 2)	Ot	(2, 3, 1)	(2, 3, 2)	Poc	(2, 3, 1)
(2, 3, 2)	Ct	(3, 3, 1)	(3, 2, 1)	Sbr	(3, 2, 2)
(3, 2, 1)	Sad	(3, 2, 2)	(3, 2, 1)	Sbd	(2, 2, 2)
(3, 3, 2)	Ot	(3, 3, 1)	(3, 3, 2)	Ct	(3, 3, 1)
(3, 3, 2)	Poc	(3, 3, 1)	(1, 2, 2)	Ot	(1, 3, 1)
(1, 2, 2)	Poc	(1, 2, 1)	(2, 2, 1)	Sbr	(2, 2, 2)
(2, 2, 1)	Sad	(2, 2, 2)	(2, 1, 1)	Sar	(2, 2, 2)
(2, 1, 1)	Sbr	(2, 1, 2)	(2, 1, 1)	Sad	(2, 1, 2)
(1, 3, 1)	Sar	(1, 2, 2)	(1, 3, 1)	Sbr	(1, 3, 2)
(1, 3, 1)	Sad	(1, 3, 2)	(1, 3, 1)	Sbd	(2, 3, 2)
(1, 1, 2)	Poc	(1, 1, 1)	(3, 2, 2)	Ot	(3, 3, 1)
(3, 2, 2)	Ct	(3, 2, 1)	(3, 2, 2)	Poc	(3, 2, 1)
(3, 3, 1)	Sar	(3, 2, 2)	(3, 3, 1)	Sbr	(3, 3, 2)
(3, 3, 1)	Sad	(3, 3, 2)	(3, 3, 1)	Sbd	(2, 3, 2)

Continua na próxima página

Tabela G.1 –Autômato Controlador  $G_c$  - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
(2, 1, 2)	Ct	(3, 1, 1)	(2, 1, 2)	Poc	(2, 1, 1)
(1, 1, 1)	Sar	(1, 2, 2)	(1, 1, 1)	Sbr	(1, 1, 2)
(1, 1, 1)	Sad	(1, 1, 2)	(1, 1, 1)	Sbd	(2, 1, 2)
(2, 3, 1)	Sar	(2, 2, 2)	(2, 3, 1)	Sbr	(2, 3, 2)
(2, 3, 1)	Sad	(2, 3, 2)	-	-	-

# Apêndice H

## Autômato $G$ da UST

O autômato  $G$  da UST está representado na tabela H.1, em que seu estado inicial é o 170.

Tabela H.1: Autômato  $G$  da UST

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
1	Poc	207	1	Ot	21
1	ta	212	1	tf	214
2	Poc	334	2	Ct	49
2	Ot	278	3	Sbr	2
4	Poc	187	5	Sbr	8
5	ta	350	5	tf	268
6	Sad	248	6	Sbr	41
6	tf	54	6	ta	247
6	Sar	119	7	Poc	139
7	Ct	250	7	Ot	150
7	tf	173	7	ta	22
8	Poc	256	8	Ct	149
8	tf	131	8	ta	18
9	Poc	152	9	Ct	241
9	Ot	352	9	tf	204
9	ta	199	10	Sbd	277
11	Poc	244	11	Ct	52
12	Sad	50	13	Poc	68
13	Ct	68	14	Sad	312
14	Sbd	205	15	Sar	288
15	Sbr	122	16	Poc	56

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
16	Ot	56	16	Ct	252
17	Sbr	41	17	Sar	119
17	ta	264	17	tf	266
19	Sad	357	20	Poc	187
21	tf	185	21	ta	10
22	Poc	293	22	Ot	293
22	Ct	113	23	Poc	56
23	Ot	56	23	Ct	252
24	Sbr	198	24	Sar	73
25	Sbr	8	25	ta	228
25	tf	348	26	Poc	293
26	Ot	293	26	Ct	113
27	Sbr	273	28	Poc	206
29	Poc	259	29	Ot	21
29	ta	230	29	tf	237
30	Poc	278	30	Ot	278
30	Ct	102	31	Sad	287
31	Sbd	219	32	Poc	231
32	Ct	137	32	Ot	274
33	Sar	281	34	Sad	305
34	Sbd	195	35	Poc	231
35	Ct	137	35	Ot	274
36	Poc	187	37	Sbr	83
38	Sbr	58	38	Sar	288
39	Poc	206	40	Poc	208
40	Ct	183	40	Ot	352
40	tf	226	40	ta	222
41	Poc	176	41	Ct	111
41	Ot	51	41	tf	282
41	ta	192	42	Poc	244
42	Ct	52	44	Sbr	292
45	Sbd	213	45	Sad	29
45	tf	272	45	ta	210
45	Sar	378	46	Sbr	223
46	Sar	35	47	Sad	312
47	Sbd	205	48	Poc	353

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
48	Ct	64	48	Ot	293
50	Poc	257	50	Ct	68
51	Sad	7	51	tf	336
51	ta	203	52	Sar	281
53	Poc	229	53	Ct	156
53	Ot	51	53	tf	265
53	ta	218	54	Sar	32
54	Sbr	30	55	Sad	167
56	Sad	146	57	Sad	166
57	tf	317	57	ta	47
58	Poc	144	58	Ot	144
59	Sbd	277	60	Poc	231
60	Ct	137	60	Ot	274
61	Sbr	303	61	ta	342
61	tf	84	62	Poc	293
62	Ot	293	62	Ct	113
63	Poc	102	63	Ct	102
63	Ot	102	64	Sbd	302
67	Sbr	53	67	ta	310
67	tf	314	68	Sbd	182
69	Sbr	71	69	Sar	35
70	Poc	91	70	Ot	44
72	Sad	280	72	Sbd	302
73	Poc	137	73	Ct	137
73	Ot	90	74	Sad	312
74	Sbd	195	76	Poc	91
76	Ot	44	77	Sbr	63
77	Sar	281	78	Poc	101
78	Ot	144	79	Sad	305
79	Sbd	195	81	Poc	353
81	Ct	64	81	Ot	293
83	Poc	49	83	Ct	49
83	Ot	102	84	Sbr	273
85	Poc	112	85	Ot	158
86	Sad	7	86	tf	162
86	ta	171	88	Sbd	110

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
88	Sad	125	88	tf	236
88	ta	258	88	Sar	378
90	Sbr	299	91	Sbr	270
92	Poc	64	92	Ct	64
92	Ot	113	93	Sbd	110
93	Sbr	286	93	tf	227
93	ta	179	93	Sar	378
94	Sbr	155	96	Sad	161
96	tf	332	96	ta	118
97	Sad	140	97	Sbr	307
97	tf	106	97	ta	382
97	Sar	119	98	Sbr	20
98	Sar	70	99	Poc	325
99	Ct	149	99	tf	220
99	ta	261	102	Sar	281
103	Poc	12	103	Ct	197
104	Sar	32	104	Sbr	301
105	Sar	89	105	Sbr	292
106	Sar	32	106	Sbr	301
107	Sad	167	108	Poc	158
108	Ot	158	109	Sad	92
109	Sbd	379	110	Poc	339
110	Ct	5	110	tf	300
110	ta	116	111	tf	33
111	ta	285	112	Sbd	302
113	Sbd	277	114	Poc	113
114	Ct	113	114	Ot	113
115	Sad	13	115	Sbd	296
116	Poc	12	116	Ct	197
118	Sad	305	118	Sbd	205
119	Poc	269	119	Ct	61
119	Ot	148	119	tf	60
119	ta	260	120	Sad	217
120	Sbd	103	121	Poc	257
121	Ct	68	122	Poc	187
123	Poc	102	123	Ct	102

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
123	Ot	102	124	Sbr	344
124	Sar	281	125	Poc	298
125	tf	133	125	ta	129
126	Poc	244	126	Ct	52
127	Poc	144	127	Ot	144
128	Sbr	198	128	Sar	372
129	Poc	206	130	Sad	209
130	Sbd	296	131	Poc	52
131	Ct	52	132	Sad	312
132	Sbd	195	134	Sad	140
134	Sar	119	134	ta	297
134	tf	180	135	Poc	278
135	Ot	278	135	Ct	102
136	Sbr	299	136	Sar	281
137	Sbr	273	138	Sbr	135
138	Sar	190	139	Sbr	41
139	Sar	119	139	ta	315
139	tf	46	140	Poc	354
140	Ct	235	140	tf	160
140	ta	157	141	Poc	49
141	Ct	49	141	Ot	102
143	Sad	287	143	Sbd	302
144	Sar	288	145	Sar	82
145	Sbr	299	146	Poc	293
146	Ot	293	146	Ct	113
147	Poc	101	147	Ot	144
148	Sad	7	148	tf	69
148	ta	165	149	tf	364
149	ta	249	150	tf	321
150	ta	255	151	Poc	187
152	Sbr	169	152	Sbd	184
152	ta	31	152	tf	37
153	Sad	85	153	Sbd	379
154	Sad	114	154	Sbd	23
155	Poc	334	155	Ct	49
155	Ot	278	156	tf	361

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
156	ta	245	157	Poc	257
157	Ct	68	158	Sbd	277
159	Sbd	110	159	Sbr	99
159	tf	124	159	ta	120
159	Sar	384	161	Poc	276
161	Ot	21	161	ta	242
161	tf	335	162	Sbr	71
162	Sar	200	163	Sad	217
163	Sbd	66	164	Poc	374
164	Ot	290	164	ta	331
164	tf	147	165	Sad	146
166	Poc	330	166	Ct	250
166	Ot	352	166	tf	343
166	ta	238	167	Poc	353
167	Ct	64	167	Ot	293
168	Poc	91	168	Ot	44
169	Poc	318	169	Ct	156
169	Ot	246	169	tf	141
169	ta	337	170	Sbd	271
170	Sad	319	170	Sbr	275
170	tf	15	170	ta	341
170	Sar	181	171	Sad	146
172	Sbr	299	172	Sar	372
174	Sad	9	174	Sbr	169
174	tf	329	174	ta	143
174	Sbd	184	175	Poc	137
175	Ct	137	175	Ot	90
176	Sad	248	176	Sar	119
176	ta	351	176	tf	138
178	Sbr	58	178	Sar	288
179	Sad	39	179	Sbd	103
180	Sbr	42	180	Sar	190
181	Poc	326	181	Ot	96
181	ta	43	181	tf	76
182	Poc	12	182	Ct	197
183	Sbr	279	183	ta	216

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
183	tf	172	184	Poc	333
184	Ct	284	184	Ot	86
184	tf	177	184	ta	373
185	Sbr	292	185	Sar	288
186	Poc	45	186	Ot	290
186	ta	360	186	tf	127
187	Sar	288	188	Sbd	110
188	Sad	125	188	tf	98
188	ta	130	188	Sar	378
189	Sad	48	190	Poc	231
190	Ct	137	190	Ot	274
191	Poc	376	191	Ct	111
191	Ot	246	191	tf	123
191	ta	366	193	Sad	280
193	Sbd	302	194	Sad	287
195	Poc	56	195	Ot	56
195	Ct	252	196	Sbr	270
197	Sad	217	198	Poc	52
198	Ct	52	199	Poc	64
199	Ct	64	199	Ot	113
201	Poc	334	201	Ct	49
201	Ot	278	203	Sad	146
206	Sbd	182	207	Sbr	164
207	Sbd	184	207	ta	362
207	tf	363	208	Sbd	213
208	Sbr	191	208	tf	77
208	ta	74	208	Sar	384
209	Poc	206	210	Sad	108
210	Sbd	23	211	Poc	49
211	Ct	49	211	Ot	102
212	Poc	112	212	Ot	158
213	Poc	6	213	Ct	338
213	Ot	86	213	tf	202
213	ta	16	215	Sbr	299
215	Sar	281	216	Sad	312
216	Sbd	347	217	Poc	68

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
217	Ct	68	219	Poc	107
219	Ct	194	219	Ot	56
220	Poc	52	220	Ct	52
221	Sbr	273	222	Poc	113
222	Ct	113	222	Ot	113
223	Poc	278	223	Ot	278
223	Ct	102	224	Sad	1
224	Sbr	164	224	tf	380
224	ta	193	224	Sbd	184
225	Poc	257	225	Ct	68
227	Sbr	151	227	Sar	288
228	Sad	80	228	Sbd	182
229	Sad	267	229	tf	94
229	ta	19	230	Poc	158
230	Ot	158	231	Sbr	155
232	Poc	102	232	Ct	102
232	Ot	102	233	Poc	12
233	Ct	197	234	Sbr	63
234	Sar	281	235	Sbr	8
235	ta	163	235	tf	128
236	Sbr	20	236	Sar	70
238	Poc	113	238	Ct	113
238	Ot	113	239	Sbr	155
241	Sbr	303	241	ta	263
241	tf	221	242	Poc	158
242	Ot	158	244	Sar	35
245	Sad	287	245	Sbd	302
246	Sad	166	246	tf	145
246	ta	14	247	Sad	26
248	Poc	17	248	Ct	183
248	Ot	150	248	tf	65
248	ta	62	249	Sad	217
249	Sbd	182	250	Sbr	279
250	ta	253	250	tf	215
251	Sad	9	251	Sbd	184
251	ta	356	251	tf	27

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
252	Sad	312	253	Sbd	277
254	Sad	340	254	Sbd	302
256	Sbd	110	256	Sad	306
256	tf	24	256	ta	349
256	Sar	384	258	Sad	209
258	Sbd	296	259	Sbd	213
259	Sbr	186	259	tf	38
259	ta	34	259	Sar	378
262	Sbr	243	262	Sar	281
263	Sad	287	263	Sbd	371
264	Sad	146	265	Poc	334
265	Ct	49	265	Ot	278
266	Sbr	223	266	Sar	35
267	Poc	67	267	Ct	241
267	Ot	150	267	tf	87
267	ta	81	268	Sar	372
268	Sbr	198	269	Sad	267
269	Sbr	53	269	ta	55
269	tf	239	270	Poc	101
270	Ot	144	271	Poc	97
271	Ct	25	271	tf	142
271	ta	320	272	Sbr	292
272	Sar	70	273	Poc	49
273	Ct	49	273	Ot	102
274	Sbr	135	275	Poc	188
275	tf	4	275	ta	355
276	Sbd	213	276	Sbr	186
276	tf	178	276	ta	79
276	Sar	378	277	Poc	56
277	Ot	56	277	Ct	252
278	Sar	35	279	Poc	291
279	Ct	111	279	Ot	57
279	tf	232	279	ta	117
280	Poc	112	280	Ot	158
281	Poc	137	281	Ct	137
281	Ot	90	282	Poc	278

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
282	Ot	278	282	Ct	102
283	Sad	121	284	Sbr	303
284	ta	254	284	tf	370
285	Sad	312	285	Sbd	277
286	Poc	88	286	tf	36
286	ta	75	287	Poc	64
287	Ct	64	287	Ot	113
288	Poc	91	288	Ot	44
289	Sad	161	289	tf	309
289	ta	311	290	Sad	161
290	tf	105	290	ta	346
291	Sbd	213	291	Sad	40
291	tf	358	291	ta	294
291	Sar	384	292	Poc	144
292	Ot	144	294	Sad	114
294	Sbd	23	295	Sad	367
295	Sbd	277	296	Poc	12
296	Ct	197	297	Sad	225
298	Sbd	110	298	Sbr	286
298	tf	368	298	ta	365
298	Sar	378	299	Poc	102
299	Ct	102	299	Ot	102
301	Poc	244	301	Ct	52
302	Poc	107	302	Ct	194
302	Ot	56	303	Poc	251
303	Ct	156	303	Ot	57
303	tf	211	303	ta	95
304	Sad	50	305	Poc	158
305	Ot	158	306	Poc	159
306	Ct	235	306	tf	328
306	ta	322	307	Poc	134
307	Ct	149	307	tf	11
307	ta	100	308	Sbr	126
308	Sar	35	309	Sbr	240
309	Sar	288	310	Sad	167
311	Sad	305	311	Sbd	205

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
312	Poc	113	312	Ct	113
312	Ot	113	313	Sar	372
313	Sbr	299	314	Sbr	201
315	Sad	146	317	Sbr	299
317	Sar	82	318	Sad	9
318	Sbd	184	318	ta	109
318	tf	381	319	Poc	93
319	tf	316	319	ta	359
320	Poc	12	320	Ct	197
321	Sbr	135	321	Sar	35
322	Poc	68	322	Ct	68
323	Poc	293	323	Ot	293
323	Ct	113	324	Sbr	299
324	Sar	73	325	Sbd	110
325	Sad	306	325	tf	375
325	ta	115	325	Sar	384
326	Sad	1	326	Sbr	164
326	tf	196	326	ta	72
326	Sbd	184	327	Sbr	270
329	Sbr	273	330	Sbd	213
330	Sbr	191	330	tf	234
330	ta	132	330	Sar	384
332	Sbr	240	332	Sar	288
333	Sad	267	333	Sbr	53
333	ta	189	333	tf	3
336	Sar	200	336	Sbr	135
338	Sbr	279	338	ta	295
338	tf	313	339	Sad	140
339	Sbr	307	339	tf	104
339	ta	283	339	Sar	119
341	Sad	28	341	Sbd	233
342	Sad	340	342	Sbd	371
344	Poc	52	344	Ct	52
345	Sad	166	345	tf	262
345	ta	369	346	Sad	305
346	Sbd	205	348	Sbr	198

Continua na próxima página

Tabela H.1 –Autômato  $G$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$	$x$	$\sigma$	$y$
348	Sar	372	349	Sad	13
349	Sbd	296	350	Sad	80
350	Sbd	182	351	Sad	323
352	tf	136	352	ta	59
354	Sbr	307	354	Sar	119
354	ta	304	354	tf	308
356	Sad	92	356	Sbd	379
357	Poc	353	357	Ct	64
357	Ot	293	358	Sbr	299
358	Sar	73	359	Poc	206
362	Sad	280	362	Sbd	219
363	Sbr	78	364	Sar	281
365	Sad	39	365	Sbd	103
368	Sbr	151	368	Sar	288
369	Sad	312	369	Sbd	205
370	Sbr	273	373	Poc	107
373	Ct	194	373	Ot	56
374	Sad	1	374	Sbd	184
374	ta	153	374	tf	327
375	Sbr	198	375	Sar	73
376	Sbd	213	376	Sad	40
376	tf	324	376	ta	154
376	Sar	384	378	Poc	224
378	Ot	289	378	ta	377
378	tf	168	379	Poc	107
379	Ct	194	379	Ot	56
380	Sbr	270	381	Sbr	273
382	Sad	121	384	Poc	174
384	Ct	61	384	Ot	345
384	tf	175	384	ta	383

# Apêndice I

## Autômato $G_d$ da UST para a falha da válvula travada-aberta

O autômato  $G_d$  para a falha da válvula travada-aberta da UST está representado na tabela I.1, em que seu estado inicial é o  $((15, Y), (170, N), (341, N))$ .

Tabela I.1: Autômato  $G_d$  da UST

$x$	$\sigma$	$y$
((280,N))	Poc	((112,N))
((280,N))	Ot	((158,N))
((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))	Poc	((139,N),(315,N),(46,Y),(293,N))
((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))	Ct	((215,Y),(250,N),(253,N),(113,N))
((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))	Ot	((321,Y),(150,N),(255,N),(293,N))
((265,Y),(53,N),(218,N),(155,Y))	Poc	((334,Y),(229,N),(19,N),(94,Y))
((265,Y),(53,N),(218,N),(155,Y))	Ct	((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))
((265,Y),(53,N),(218,N),(155,Y))	Ot	((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))
((56,N))	Sad	((146,N))
((52,Y),(375,Y),(115,N),(325,N))	Sbd	((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))
((52,Y),(375,Y),(115,N),(325,N))	Sbr	((198,Y))
((52,Y),(375,Y),(115,N),(325,N))	Sad	((306,N),(328,Y),(322,N),(13,N))
((52,Y),(375,Y),(115,N),(325,N))	Sar	((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((102,Y))	Sar	((281,Y))
((158,N))	Sbd	((277,N))
((231,Y))	Sbr	((155,Y))
((72,N),(196,Y),(326,N),(91,Y))	Sbd	((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))
((72,N),(196,Y),(326,N),(91,Y))	Sad	((1,N),(214,Y),(280,N),(212,N))
((72,N),(196,Y),(326,N),(91,Y))	Sbr	((147,Y),(164,N),(331,N),(270,Y))
((147,Y),(164,N),(331,N),(270,Y))	Poc	((153,N),(101,Y),(327,Y),(374,N))
((147,Y),(164,N),(331,N),(270,Y))	Ot	((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))
((103,N),(300,Y),(182,N),(110,N),(116,N))	Poc	((12,N),(283,N),(104,Y),(339,N))
((103,N),(300,Y),(182,N),(110,N),(116,N))	Ct	((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))
((198,Y),(8,N),(131,Y),(18,N))	Poc	((52,Y),(349,N),(256,N),(24,Y))
((198,Y),(8,N),(131,Y),(18,N))	Ct	((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))

Continua na próxima página

Tabela I.1 – Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((167,N),(267,N),(81,N),(48,N),(87,Y))	Poc	((353,N),(67,N),(310,N),(314,Y))
((167,N),(267,N),(81,N),(48,N),(87,Y))	Ct	((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))
((167,N),(267,N),(81,N),(48,N),(87,Y))	Ot	((321,Y),(150,N),(255,N),(293,N))
((17,N),(266,Y),(264,N),(293,N))	Sad	((146,N))
((17,N),(266,Y),(264,N),(293,N))	Sar	((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))
((17,N),(266,Y),(264,N),(293,N))	Sbr	((41,N),(223,Y),(282,Y),(192,N))
((146,N))	Poc	((293,N))
((146,N))	Ot	((293,N))
((146,N))	Ct	((113,N))
((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))	Poc	((269,N),(239,Y),(55,N),(231,Y))
((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))	Ct	((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))
((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))	Ot	((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))
((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))	Sbr	((299,Y))
((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))	Sad	((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))
((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))	Sar	((82,Y),(281,Y))
((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))	Sbd	((205,N))
((179,N),(227,Y),(93,N),(206,N))	Sbr	((151,Y),(75,N),(36,Y),(286,N))
((179,N),(227,Y),(93,N),(206,N))	Sad	((39,N))
((179,N),(227,Y),(93,N),(206,N))	Sar	((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((179,N),(227,Y),(93,N),(206,N))	Sbd	((300,Y),(182,N),(103,N),(110,N),(116,N))
((217,N))	Poc	((68,N))
((217,N))	Ct	((68,N))
((54,Y),(247,N),(56,N),(6,N))	Sbr	((192,N),(41,N),(282,Y),(30,Y))
((54,Y),(247,N),(56,N),(6,N))	Sad	((248,N),(146,N),(26,N),(65,Y),(62,N))
((54,Y),(247,N),(56,N),(6,N))	Sar	((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))
((157,N),(140,N),(160,Y),(50,N),(121,N))	Poc	((304,N),(257,N),(354,N),(308,Y))
((157,N),(140,N),(160,Y),(50,N),(121,N))	Ct	((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))
((301,Y),(11,Y),(307,N),(100,N))	Poc	((297,N),(180,Y),(134,N),(244,Y))
((301,Y),(11,Y),(307,N),(100,N))	Ct	((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))
((139,N),(315,N),(46,Y),(293,N))	Sad	((146,N))
((139,N),(315,N),(46,Y),(293,N))	Sar	((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))
((139,N),(315,N),(46,Y),(293,N))	Sbr	((41,N),(223,Y),(282,Y),(192,N))
((243,Y),(299,Y))	Poc	((102,Y))
((243,Y),(299,Y))	Ct	((102,Y))
((243,Y),(299,Y))	Ot	((102,Y))
((244,Y))	Sar	((35,Y))
((192,N),(41,N),(282,Y),(30,Y))	Poc	((351,N),(138,Y),(176,N),(278,Y))
((192,N),(41,N),(282,Y),(30,Y))	Ct	((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))
((192,N),(41,N),(282,Y),(30,Y))	Ot	((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))
((78,Y),(147,Y),(164,N),(331,N))	Poc	((153,N),(101,Y),(327,Y),(374,N))
((78,Y),(147,Y),(164,N),(331,N))	Ot	((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))
((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))	Sbr	((292,Y))
((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))	Sad	((335,Y),(305,N),(161,N),(242,N))
((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))	Sar	((89,Y),(288,Y))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))	Sbd	((205,N))
((215,Y),(250,N),(253,N),(113,N))	Sbr	((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))
((215,Y),(250,N),(253,N),(113,N))	Sar	((281,Y))
((215,Y),(250,N),(253,N),(113,N))	Sbd	((277,N))
((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))	Sbr	((198,Y),(8,N),(131,Y),(18,N))
((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))	Sad	((217,N))
((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))	Sar	((372,Y))
((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))	Sbd	((182,N),(66,N))
((306,N),(328,Y),(322,N),(13,N))	Poc	((159,N),(124,Y),(120,N),(68,N))
((306,N),(328,Y),(322,N),(13,N))	Ct	((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))
((155,Y))	Poc	((334,Y))
((155,Y))	Ct	((49,Y))
((155,Y))	Ot	((278,Y))
((248,N),(146,N),(26,N),(65,Y),(62,N))	Poc	((17,N),(266,Y),(264,N),(293,N))
((248,N),(146,N),(26,N),(65,Y),(62,N))	Ct	((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))
((248,N),(146,N),(26,N),(65,Y),(62,N))	Ot	((321,Y),(255,N),(293,N),(150,N))
((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))	Poc	((294,N),(102,Y),(358,Y),(291,N))
((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))	Ct	((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))
((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))	Ot	((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))
((137,Y))	Sbr	((273,Y))
((136,Y),(113,N),(59,N),(352,N))	Sbd	((277,N))
((136,Y),(113,N),(59,N),(352,N))	Sar	((281,Y))
((136,Y),(113,N),(59,N),(352,N))	Sbr	((299,Y))
((292,Y),(240,Y))	Poc	((144,Y))
((292,Y),(240,Y))	Ot	((144,Y))
((371,N),(302,N))	Poc	((107,N))
((371,N),(302,N))	Ct	((194,N))
((371,N),(302,N))	Ot	((56,N))
((3,Y),(333,N),(189,N),(107,N))	Sad	((167,N),(267,N),(81,N),(48,N),(87,Y))
((3,Y),(333,N),(189,N),(107,N))	Sbr	((265,Y),(53,N),(2,Y),(218,N))
((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))	Sad	((287,N))
((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))	Sbd	((302,N))
((1,N),(214,Y),(280,N),(212,N))	Poc	((362,N),(207,N),(112,N),(363,Y))
((1,N),(214,Y),(280,N),(212,N))	Ot	((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))
((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))	Poc	((234,Y),(330,N),(113,N),(132,N))
((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))	Ct	((215,Y),(250,N),(253,N),(113,N))
((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))	Ot	((136,Y),(113,N),(59,N),(352,N))
((68,N))	Sbd	((182,N))
((362,N),(207,N),(112,N),(363,Y))	Sbd	((177,Y),(184,N),(302,N),(219,N),(373,N))
((362,N),(207,N),(112,N),(363,Y))	Sad	((280,N))
((362,N),(207,N),(112,N),(363,Y))	Sbr	((78,Y),(147,Y),(164,N),(331,N))
((96,N),(44,Y),(118,N),(332,Y))	Sbd	((205,N))
((96,N),(44,Y),(118,N),(332,Y))	Sad	((335,Y),(305,N),(161,N),(242,N))
((96,N),(44,Y),(118,N),(332,Y))	Sar	((288,Y))

Continua na próxima página

Tabela I.1 – Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((96,N),(44,Y),(118,N),(332,Y))	Sbr	((292,Y),(240,Y))
((288,Y))	Poc	((91,Y))
((288,Y))	Ot	((44,Y))
((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))	Sad	((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))
((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))	Sar	((35,Y))
((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))	Sbr	((135,Y),(71,Y))
((265,Y),(53,N),(2,Y),(218,N))	Poc	((334,Y),(229,N),(19,N),(94,Y))
((265,Y),(53,N),(2,Y),(218,N))	Ct	((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))
((265,Y),(53,N),(2,Y),(218,N))	Ot	((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))
((91,Y))	Sbr	((270,Y))
((287,N))	Poc	((64,N))
((287,N))	Ct	((64,N))
((287,N))	Ot	((113,N))
((52,Y),(349,N),(256,N),(24,Y))	Sbr	((198,Y))
((52,Y),(349,N),(256,N),(24,Y))	Sad	((306,N),(328,Y),(322,N),(13,N))
((52,Y),(349,N),(256,N),(24,Y))	Sar	((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((52,Y),(349,N),(256,N),(24,Y))	Sbd	((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))
((294,N),(102,Y),(358,Y),(291,N))	Sbd	((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))
((294,N),(102,Y),(358,Y),(291,N))	Sbr	((299,Y))
((294,N),(102,Y),(358,Y),(291,N))	Sad	((114,N),(222,N),(40,N),(226,Y))
((294,N),(102,Y),(358,Y),(291,N))	Sar	((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((270,Y))	Poc	((101,Y))
((270,Y))	Ot	((144,Y))
((318,N),(381,Y),(49,Y),(109,N))	Sbd	((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))
((318,N),(381,Y),(49,Y),(109,N))	Sad	((204,Y),(199,N),(92,N),(9,N))
((318,N),(381,Y),(49,Y),(109,N))	Sbr	((273,Y))
((384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Poc	((174,N),(329,Y),(143,N),(137,Y))
((384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Ct	((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))
((384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Ot	((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))
((41,N),(223,Y),(282,Y),(192,N))	Poc	((351,N),(138,Y),(176,N),(278,Y))
((41,N),(223,Y),(282,Y),(192,N))	Ct	((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))
((41,N),(223,Y),(282,Y),(192,N))	Ot	((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))
((169,N),(337,N),(141,Y),(83,Y))	Poc	((318,N),(381,Y),(49,Y),(109,N))
((169,N),(337,N),(141,Y),(83,Y))	Ct	((156,N),(49,Y),(361,Y),(245,N))
((169,N),(337,N),(141,Y),(83,Y))	Ot	((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))
((353,N),(67,N),(310,N),(314,Y))	Sad	((167,N))
((353,N),(67,N),(310,N),(314,Y))	Sbr	((265,Y),(53,N),(201,Y),(218,N))
((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))	Sad	((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))
((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))	Sar	((200,Y),(35,Y))
((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))	Sbr	((135,Y))
((287,N),(199,N),(204,Y),(9,N))	Poc	((37,Y),(152,N),(64,N),(31,N))
((287,N),(199,N),(204,Y),(9,N))	Ct	((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))
((287,N),(199,N),(204,Y),(9,N))	Ot	((136,Y),(352,N),(59,N),(113,N))
((100,N),(11,Y),(307,N),(126,Y))	Poc	((297,N),(180,Y),(134,N),(244,Y))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((100,N),(11,Y),(307,N),(126,Y))	Ct	((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))
((206,N))	Sbd	((182,N))
((237,Y),(230,N),(108,N),(29,N))	Poc	((259,N),(158,N),(34,N),(38,Y))
((237,Y),(230,N),(108,N),(29,N))	Ot	((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))
((193,N),(224,N),(91,Y),(380,Y))	Sbd	((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))
((193,N),(224,N),(91,Y),(380,Y))	Sad	((1,N),(214,Y),(280,N),(212,N))
((193,N),(224,N),(91,Y),(380,Y))	Sbr	((147,Y),(164,N),(331,N),(270,Y))
((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))	Sbr	((198,Y),(8,N),(131,Y),(18,N))
((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))	Sad	((80,N),(217,N))
((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))	Sar	((372,Y))
((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))	Sbd	((182,N))
((204,Y),(199,N),(92,N),(9,N))	Poc	((37,Y),(152,N),(64,N),(31,N))
((204,Y),(199,N),(92,N),(9,N))	Ct	((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))
((204,Y),(199,N),(92,N),(9,N))	Ot	((136,Y),(352,N),(59,N),(113,N))
((82,Y),(281,Y))	Poc	((137,Y))
((82,Y),(281,Y))	Ct	((137,Y))
((82,Y),(281,Y))	Ot	((90,Y))
((302,N))	Poc	((107,N))
((302,N))	Ct	((194,N))
((302,N))	Ot	((56,N))
((177,Y),(219,N),(302,N),(184,N),(373,N))	Poc	((3,Y),(333,N),(189,N),(107,N))
((177,Y),(219,N),(302,N),(184,N),(373,N))	Ct	((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))
((177,Y),(219,N),(302,N),(184,N),(373,N))	Ot	((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))
((305,N))	Poc	((158,N))
((305,N))	Ot	((158,N))
((153,N),(101,Y),(327,Y),(374,N))	Sbd	((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))
((153,N),(101,Y),(327,Y),(374,N))	Sad	((1,N),(214,Y),(85,N),(212,N))
((153,N),(101,Y),(327,Y),(374,N))	Sbr	((270,Y))
((1,N),(214,Y),(85,N),(212,N))	Poc	((362,N),(207,N),(112,N),(363,Y))
((1,N),(214,Y),(85,N),(212,N))	Ot	((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))
((107,N))	Sad	((167,N))
((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))	Poc	((3,Y),(333,N),(189,N),(107,N))
((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))	Ct	((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))
((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))	Ot	((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))
((42,Y))	Poc	((244,Y))
((42,Y))	Ct	((52,Y))
((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))	Poc	((269,N),(239,Y),(55,N),(231,Y))
((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))	Ct	((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))
((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))	Ot	((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))
((267,N),(81,N),(357,N),(87,Y))	Poc	((353,N),(67,N),(310,N),(314,Y))
((267,N),(81,N),(357,N),(87,Y))	Ct	((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))
((267,N),(81,N),(357,N),(87,Y))	Ot	((321,Y),(255,N),(293,N),(150,N))
((168,Y),(70,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))	Poc	((193,N),(224,N),(91,Y),(380,Y))
((168,Y),(70,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))	Ot	((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))

Continua na próxima página

Tabela I.1 – Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))	Poc	((54,Y),(247,N),(56,N),(6,N))
((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))	Ct	((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))
((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))	Ot	((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))
((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))	Poc	((3,Y),(333,N),(189,N),(107,N))
((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))	Ct	((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))
((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))	Ot	((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))
((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))	Sbd	((371,N))
((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))	Sad	((340,N))
((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))	Sbr	((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))
((157,N),(225,N),(140,N),(160,Y))	Poc	((304,N),(257,N),(354,N),(308,Y))
((157,N),(225,N),(140,N),(160,Y))	Ct	((128,Y),(235,N),(163,N),(68,N))
((135,Y))	Poc	((278,Y))
((135,Y))	Ot	((278,Y))
((135,Y))	Ct	((102,Y))
((359,N),(316,Y),(28,N),(319,N))	Poc	((179,N),(227,Y),(93,N),(206,N))
((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))	Poc	((193,N),(224,N),(91,Y),(380,Y))
((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))	Ot	((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))
((271,N),(320,N),(233,N),(142,Y))	Poc	((12,N),(382,N),(106,Y),(97,N))
((271,N),(320,N),(233,N),(142,Y))	Ct	((228,N),(197,N),(348,Y),(25,N))
((200,Y),(35,Y))	Poc	((231,Y))
((200,Y),(35,Y))	Ct	((137,Y))
((200,Y),(35,Y))	Ot	((274,Y))
((44,Y))	Sbr	((292,Y))
((122,Y),(4,Y),(355,N),(275,N))	Poc	((188,N),(130,N),(98,Y),(187,Y))
((356,N),(27,Y),(49,Y),(251,N))	Sbd	((184,N),(177,Y),(373,N),(379,N))
((356,N),(27,Y),(49,Y),(251,N))	Sad	((204,Y),(199,N),(92,N),(9,N))
((356,N),(27,Y),(49,Y),(251,N))	Sbr	((273,Y))
((274,Y))	Sbr	((135,Y))
((234,Y),(330,N),(113,N),(132,N))	Sbr	((366,N),(191,N),(123,Y),(63,Y))
((234,Y),(330,N),(113,N),(132,N))	Sad	((312,N))
((234,Y),(330,N),(113,N),(132,N))	Sar	((384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((234,Y),(330,N),(113,N),(132,N))	Sbd	((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))
((197,N))	Sad	((217,N))
((144,Y))	Sar	((288,Y))
((186,N),(127,Y),(360,N),(58,Y))	Poc	((144,Y),(272,Y),(45,N),(210,N))
((186,N),(127,Y),(360,N),(58,Y))	Ot	((346,N),(144,Y),(105,Y),(290,N))
((90,Y))	Sbr	((299,Y))
((273,Y))	Poc	((49,Y))
((273,Y))	Ct	((49,Y))
((273,Y))	Ot	((102,Y))
((15,Y),(170,N),(341,N))	Sbr	((122,Y),(4,Y),(355,N),(275,N))
((15,Y),(170,N),(341,N))	Sad	((359,N),(316,Y),(28,N),(319,N))
((15,Y),(170,N),(341,N))	Sar	((181,N),(43,N),(76,Y),(288,Y))
((15,Y),(170,N),(341,N))	Sbd	((271,N),(320,N),(233,N),(142,Y))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((273,Y),(337,N),(141,Y),(169,N))	Poc	((318,N),(381,Y),(49,Y),(109,N))
((273,Y),(337,N),(141,Y),(169,N))	Ct	((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))
((273,Y),(337,N),(141,Y),(169,N))	Ot	((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))
((252,N))	Sad	((312,N))
((304,N),(257,N),(354,N),(308,Y))	Sad	((50,N))
((304,N),(257,N),(354,N),(308,Y))	Sar	((60,Y),(35,Y),(119,N),(260,N))
((304,N),(257,N),(354,N),(308,Y))	Sbr	((100,N),(11,Y),(307,N),(126,Y))
((135,Y),(71,Y))	Poc	((278,Y))
((135,Y),(71,Y))	Ot	((278,Y))
((135,Y),(71,Y))	Ct	((102,Y))
((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))	Sbd	((277,N))
((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))	Sar	((288,Y))
((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))	Sbr	((292,Y))
((89,Y),(288,Y))	Poc	((91,Y))
((89,Y),(288,Y))	Ot	((44,Y))
((297,N),(180,Y),(134,N),(244,Y))	Sad	((157,N),(225,N),(140,N),(160,Y))
((297,N),(180,Y),(134,N),(244,Y))	Sar	((35,Y),(119,N),(190,Y),(60,Y),(260,N))
((297,N),(180,Y),(134,N),(244,Y))	Sbr	((42,Y))
((236,Y),(88,N),(258,N),(187,Y))	Sbr	((20,Y))
((236,Y),(88,N),(258,N),(187,Y))	Sad	((125,N),(133,Y),(209,N),(129,N))
((236,Y),(88,N),(258,N),(187,Y))	Sar	((168,Y),(70,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((236,Y),(88,N),(258,N),(187,Y))	Sbd	((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))
((334,Y),(229,N),(19,N),(94,Y))	Sad	((267,N),(81,N),(357,N),(87,Y))
((334,Y),(229,N),(19,N),(94,Y))	Sbr	((155,Y))
((228,N),(197,N),(348,Y),(25,N))	Sbr	((198,Y),(8,N),(131,Y),(18,N))
((228,N),(197,N),(348,Y),(25,N))	Sad	((80,N),(217,N))
((228,N),(197,N),(348,Y),(25,N))	Sar	((372,Y))
((228,N),(197,N),(348,Y),(25,N))	Sbd	((182,N))
((64,N))	Sbd	((302,N))
((144,Y),(272,Y),(45,N),(210,N))	Sbr	((292,Y))
((144,Y),(272,Y),(45,N),(210,N))	Sad	((237,Y),(230,N),(108,N),(29,N))
((144,Y),(272,Y),(45,N),(210,N))	Sar	((168,Y),(70,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((144,Y),(272,Y),(45,N),(210,N))	Sbd	((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))
((281,Y))	Poc	((137,Y))
((281,Y))	Ct	((137,Y))
((281,Y))	Ot	((90,Y))
((278,Y))	Sar	((35,Y))
((182,N))	Poc	((12,N))
((182,N))	Ct	((197,N))
((112,N))	Sbd	((302,N))
((159,N),(124,Y),(120,N),(68,N))	Sbr	((99,N),(261,N),(344,Y),(220,Y))
((159,N),(124,Y),(120,N),(68,N))	Sad	((217,N))
((159,N),(124,Y),(120,N),(68,N))	Sar	((383,N),(175,Y),(281,Y),(384,N))
((159,N),(124,Y),(120,N),(68,N))	Sbd	((103,N),(300,Y),(182,N),(110,N),(116,N))

Continua na próxima página

Tabela I.1 – Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((12,N))	Sad	((50,N))
((181,N),(43,N),(76,Y),(288,Y))	Poc	((72,N),(196,Y),(326,N),(91,Y))
((181,N),(43,N),(76,Y),(288,Y))	Ot	((96,N),(44,Y),(118,N),(332,Y))
((12,N),(283,N),(104,Y),(339,N))	Sbr	((301,Y),(11,Y),(307,N),(100,N))
((12,N),(283,N),(104,Y),(339,N))	Sad	((157,N),(140,N),(160,Y),(50,N),(121,N))
((12,N),(283,N),(104,Y),(339,N))	Sar	((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))
((194,N))	Sad	((287,N))
((267,N),(81,N),(87,Y),(167,N))	Poc	((353,N),(67,N),(310,N),(314,Y))
((267,N),(81,N),(87,Y),(167,N))	Ct	((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))
((267,N),(81,N),(87,Y),(167,N))	Ot	((321,Y),(255,N),(293,N),(150,N))
((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))	Sbr	((299,Y))
((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))	Sad	((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))
((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))	Sar	((82,Y),(281,Y))
((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))	Sbd	((205,N))
((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))	Sbd	((277,N))
((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))	Sad	((367,N),(312,N))
((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))	Sar	((372,Y))
((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))	Sbr	((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))
((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))	Sbd	((302,N))
((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))	Sad	((287,N),(340,N))
((194,N),(370,Y),(254,N),(284,N))	Sbr	((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))
((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Poc	((174,N),(329,Y),(143,N),(137,Y))
((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Ct	((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))
((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))	Ot	((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))
((351,N),(138,Y),(176,N),(278,Y))	Sad	((248,N),(65,Y),(323,N),(62,N))
((351,N),(138,Y),(176,N),(278,Y))	Sar	((35,Y),(119,N),(190,Y),(60,Y),(260,N))
((351,N),(138,Y),(176,N),(278,Y))	Sbr	((135,Y))
((20,Y))	Poc	((187,Y))
((125,N),(133,Y),(209,N),(129,N))	Poc	((365,N),(298,N),(368,Y),(206,N))
((321,Y),(150,N),(255,N),(293,N))	Sbr	((135,Y))
((321,Y),(150,N),(255,N),(293,N))	Sar	((35,Y))
((312,N))	Poc	((113,N))
((312,N))	Ct	((113,N))
((312,N))	Ot	((113,N))
((114,N),(222,N),(40,N),(226,Y))	Poc	((77,Y),(208,N),(74,N),(113,N))
((114,N),(222,N),(40,N),(226,Y))	Ct	((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))
((114,N),(222,N),(40,N),(226,Y))	Ot	((136,Y),(352,N),(59,N),(113,N))
((188,N),(130,N),(98,Y),(187,Y))	Sbr	((20,Y))
((188,N),(130,N),(98,Y),(187,Y))	Sad	((125,N),(133,Y),(209,N),(129,N))
((188,N),(130,N),(98,Y),(187,Y))	Sar	((168,Y),(70,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((188,N),(130,N),(98,Y),(187,Y))	Sbd	((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))
((366,N),(191,N),(123,Y),(63,Y))	Poc	((376,N),(324,Y),(102,Y),(154,N))
((366,N),(191,N),(123,Y),(63,Y))	Ct	((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))
((366,N),(191,N),(123,Y),(63,Y))	Ot	((14,N),(145,Y),(102,Y),(246,N))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((187,Y))	Sar	((288,Y))
((365,N),(298,N),(368,Y),(206,N))	Sbd	((300,Y),(182,N),(103,N),(110,N),(116,N))
((365,N),(298,N),(368,Y),(206,N))	Sad	((39,N))
((365,N),(298,N),(368,Y),(206,N))	Sar	((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((365,N),(298,N),(368,Y),(206,N))	Sbr	((151,Y),(75,N),(36,Y),(286,N))
((99,N),(261,N),(344,Y),(220,Y))	Poc	((52,Y),(375,Y),(115,N),(325,N))
((99,N),(261,N),(344,Y),(220,Y))	Ct	((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))
((37,Y),(152,N),(64,N),(31,N))	Sbd	((177,Y),(219,N),(302,N),(184,N),(373,N))
((37,Y),(152,N),(64,N),(31,N))	Sad	((287,N))
((37,Y),(152,N),(64,N),(31,N))	Sbr	((169,N),(337,N),(141,Y),(83,Y))
((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))	Poc	((356,N),(27,Y),(49,Y),(251,N))
((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))	Ct	((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))
((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))	Ot	((317,Y),(57,N),(102,Y),(47,N))
((174,N),(329,Y),(143,N),(137,Y))	Sbd	((184,N),(177,Y),(302,N),(373,N))
((174,N),(329,Y),(143,N),(137,Y))	Sad	((287,N),(199,N),(204,Y),(9,N))
((174,N),(329,Y),(143,N),(137,Y))	Sbr	((273,Y),(337,N),(141,Y),(169,N))
((259,N),(158,N),(34,N),(38,Y))	Sbr	((186,N),(127,Y),(360,N),(58,Y))
((259,N),(158,N),(34,N),(38,Y))	Sad	((305,N))
((259,N),(158,N),(34,N),(38,Y))	Sar	((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((259,N),(158,N),(34,N),(38,Y))	Sbd	((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))
((277,N),(347,N))	Poc	((56,N))
((277,N),(347,N))	Ot	((56,N))
((277,N),(347,N))	Ct	((252,N))
((50,N))	Poc	((257,N))
((50,N))	Ct	((68,N))
((269,N),(239,Y),(55,N),(231,Y))	Sad	((267,N),(81,N),(87,Y),(167,N))
((269,N),(239,Y),(55,N),(231,Y))	Sbr	((265,Y),(53,N),(218,N),(155,Y))
((52,Y))	Sar	((281,Y))
((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))	Sbd	((277,N))
((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))	Sad	((312,N))
((111,N),(285,N),(102,Y),(33,Y))	Sar	((281,Y))
((35,Y))	Poc	((231,Y))
((35,Y))	Ct	((137,Y))
((35,Y))	Ot	((274,Y))
((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))	Sbd	((371,N),(302,N))
((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))	Sad	((287,N))
((221,Y),(64,N),(263,N),(241,N))	Sbr	((211,Y),(303,N),(273,Y),(95,N))
((367,N),(312,N))	Poc	((113,N))
((367,N),(312,N))	Ct	((113,N))
((367,N),(312,N))	Ot	((113,N))
((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))	Sbd	((277,N),(347,N))
((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))	Sad	((312,N))
((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))	Sar	((372,Y))
((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))	Sbr	((279,N),(117,N),(299,Y),(232,Y))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((35,Y),(119,N),(190,Y),(60,Y),(260,N))	Poc	((269,N),(239,Y),(55,N),(231,Y))
((35,Y),(119,N),(190,Y),(60,Y),(260,N))	Ct	((342,N),(84,Y),(61,N),(137,Y))
((35,Y),(119,N),(190,Y),(60,Y),(260,N))	Ot	((148,N),(165,N),(274,Y),(69,Y))
((167,N))	Poc	((353,N))
((167,N))	Ct	((64,N))
((167,N))	Ot	((293,N))
((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))	Poc	((54,Y),(247,N),(56,N),(6,N))
((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))	Ct	((338,N),(252,N),(295,N),(313,Y))
((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))	Ot	((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))
((335,Y),(305,N),(161,N),(242,N))	Poc	((178,Y),(158,N),(79,N),(276,N))
((335,Y),(305,N),(161,N),(242,N))	Ot	((185,Y),(158,N),(21,N),(10,N))
((198,Y))	Poc	((52,Y))
((198,Y))	Ct	((52,Y))
((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))	Sbr	((240,Y),(292,Y))
((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))	Sad	((335,Y),(305,N),(161,N),(242,N))
((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))	Sar	((288,Y))
((309,Y),(44,Y),(289,N),(311,N))	Sbd	((205,N))
((113,N))	Sbd	((277,N))
((265,Y),(53,N),(201,Y),(218,N))	Poc	((334,Y),(229,N),(19,N),(94,Y))
((265,Y),(53,N),(201,Y),(218,N))	Ct	((49,Y),(245,N),(361,Y),(156,N))
((265,Y),(53,N),(201,Y),(218,N))	Ot	((51,N),(203,N),(278,Y),(336,Y))
((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))	Sbd	((182,N))
((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))	Sad	((217,N))
((52,Y),(364,Y),(249,N),(149,N))	Sar	((281,Y))
((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))	Poc	((12,N),(283,N),(104,Y),(339,N))
((110,N),(300,Y),(296,N),(116,N))	Ct	((350,N),(197,N),(268,Y),(5,N))
((178,Y),(158,N),(79,N),(276,N))	Sbd	((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))
((178,Y),(158,N),(79,N),(276,N))	Sbr	((186,N),(127,Y),(360,N),(58,Y))
((178,Y),(158,N),(79,N),(276,N))	Sad	((305,N))
((178,Y),(158,N),(79,N),(276,N))	Sar	((168,Y),(377,N),(288,Y),(378,N))
((12,N),(382,N),(106,Y),(97,N))	Sbr	((301,Y),(11,Y),(307,N),(100,N))
((12,N),(382,N),(106,Y),(97,N))	Sad	((157,N),(140,N),(160,Y),(50,N),(121,N))
((12,N),(382,N),(106,Y),(97,N))	Sar	((60,Y),(260,N),(119,N),(32,Y))
((248,N),(65,Y),(323,N),(62,N))	Poc	((17,N),(266,Y),(264,N),(293,N))
((248,N),(65,Y),(323,N),(62,N))	Ct	((183,N),(216,N),(113,N),(172,Y))
((248,N),(65,Y),(323,N),(62,N))	Ot	((321,Y),(255,N),(293,N),(150,N))
((182,N),(66,N))	Poc	((12,N))
((182,N),(66,N))	Ct	((197,N))
((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))	Sbr	((243,Y),(299,Y))
((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))	Sad	((166,N),(343,Y),(238,N),(312,N))
((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))	Sar	((281,Y))
((369,N),(262,Y),(90,Y),(345,N))	Sbd	((205,N))
((277,N))	Poc	((56,N))
((277,N))	Ot	((56,N))

Continua na próxima página

Tabela I.1 –Autômato  $G_d$  da UST - Continuação da página anterior

$x$	$\sigma$	$y$
((277,N))	Ct	((252,N))
((287,N),(340,N))	Poc	((64,N))
((287,N),(340,N))	Ct	((64,N))
((287,N),(340,N))	Ot	((113,N))
((292,Y))	Poc	((144,Y))
((292,Y))	Ot	((144,Y))
((77,Y),(208,N),(74,N),(113,N))	Sbr	((366,N),(191,N),(123,Y),(63,Y))
((77,Y),(208,N),(74,N),(113,N))	Sad	((312,N))
((77,Y),(208,N),(74,N),(113,N))	Sar	((384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((77,Y),(208,N),(74,N),(113,N))	Sbd	((213,N),(202,Y),(277,N),(195,N),(16,N))
((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))	Sad	((173,Y),(22,N),(146,N),(7,N))
((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))	Sar	((200,Y))
((171,N),(162,Y),(56,N),(86,N))	Sbr	((71,Y))
((299,Y))	Poc	((102,Y))
((299,Y))	Ct	((102,Y))
((299,Y))	Ot	((102,Y))
((39,N))	Poc	((206,N))
((376,N),(324,Y),(102,Y),(154,N))	Sbr	((299,Y))
((376,N),(324,Y),(102,Y),(154,N))	Sad	((114,N),(222,N),(40,N),(226,Y))
((376,N),(324,Y),(102,Y),(154,N))	Sar	((73,Y),(384,N),(383,N),(175,Y),(281,Y))
((376,N),(324,Y),(102,Y),(154,N))	Sbd	((213,N),(16,N),(202,Y),(23,N))
((151,Y),(75,N),(36,Y),(286,N))	Poc	((236,Y),(88,N),(258,N),(187,Y))
((80,N),(217,N))	Poc	((68,N))
((80,N),(217,N))	Ct	((68,N))