



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

Sistema Inteligente de Suporte Operacional em  
Processos de Tratamento Primário de Petróleo

São Cristovão, 29 de fevereiro de 2012

# Sistema Inteligente de Suporte Operacional em Sistemas de Tratamento Primário de Petróleo

Carlos Eduardo Viana Nunes

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe como parte dos requisitos para obtenção do grau mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientadores: Prof. Dr. Oscar A. Z. Sotomayor (UFS)**

**Prof. Dr. João Carlos S. Basilio (UFRJ)**

São Cristóvão, 29 de fevereiro de 2012

# Agradecimento

Agradeço primeiramente a Deus, criador de todas as coisas, pelo amor infinito depositado em toda a humanidade e pela oportunidade de estar na Terra para que eu possa aprender e evoluir.

À Jesus, pelos seus ensinamentos de amor e humildade que faz guiar toda a humanidade para o bem.

Aos meus pais, Avany e Hélio que sempre me apoiam incondicionalmente e sempre estão torcendo pelas minhas conquistas e que me proporcionam todo o amor e educação necessária para viver com dignidade.

Aos meus irmãos Hélio Jr. André e Daniela pela torcida, apoio e sempre promoverem ótimos momentos de descontração, alegria e felicidade.

À minha noiva Carina, uma mulher fantástica, parceira que me ajuda sempre que eu preciso. Muito obrigado amor, pela confiança, pelo apoio e pelo amor que você sempre depositou em mim.

Aos meus animais, o meu cãozinho Godard e minha gatinha Dora, que de uma maneira tão sincera conseguem transmitir a mim valores tão importantes como amor, companheirismo, fidelidade e paz.

Aos meus orientadores Oscar A. Z. Sotomayor pelo incentivo no mestrado, pela iniciativa de me escolher para participar no Programa de Recursos Humanos da ANP e pelo apoio que sempre demonstrou e a J. C. Basílio pela confiança, incentivo e apoio no meu trabalho, e por me receber “de portas abertas” na UFRJ. Foi uma grande satisfação e um grande aprendizado trabalhar com você.

Não posso esquecer-me dos amigos e colegas que me acompanharam nessa luta, Verônica, Cássio, David, Rodrigo Ribeiro, Rodrigo Britto, Leonardo e Michael.

Obrigado a todos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

**Carlos Eduardo Viana Nunes**

**“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode  
começar agora e fazer um novo fim”**

**Chico Xavier**

# Resumo

A indústria do petróleo é um dos maiores empreendimentos industriais do mundo. A competitividade do mercado e as rigorosas leis ambientais têm motivado estas empresas a investir fortemente em um alto nível de automação nos seus processos. Como estes investimentos certamente irão continuar, as empresas de petróleo e a indústria em geral, estão direcionando seus investimentos ao combate de falhas e situações anormais. O presente propõe a implementação de um sistema inteligente que sirva de suporte na operação de um processo de tratamento primário de petróleo. O desenvolvimento do sistema tem como foco principal o projeto de um diagnosticador de falhas baseado na teoria de Sistemas a Eventos Discretos. Os resultados das simulações realizadas, com o processo operando com fluxo de alimentação estável e em padrão de golfadas, mostram um bom desempenho do sistema proposto em detectar e isolar falhas nas válvulas de controle, proporcionando uma alternativa para futuras implementações em sistemas reais.

# Abstract

The oil industry is one of the largest industrial enterprises in the world. The competitiveness of the market and strict environmental laws has motivated these companies to invest heavily in a high level of automation in their processes. As these investments will certainly continue, oil companies and industry in general, are focusing their investments to lead failures and abnormal situations. The goal of this work is to propose the implementation of an intelligent system to assist the operation of an oil primary treatment process. The development of the system is driven in the design of a fault diagnostic scheme based on the Discrete Event Systems Theory. The simulation results with the process operating with stable feed flow and slugging flow, show a good performance of the proposed system to detect and isolate faults in control valves, providing an alternative for future implementations in real systems.

# Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	1
Capítulo 2: A unidade de Separação Água-Óleo-Gás.....	8
2.1 Unidade de Separação.....	9
2.1.1 Vaso separador.....	10
2.1.2 Hidrociclone.....	11
2.2 Simulador da Unidade de Separação.....	12
2.2.1 Modelo do vaso separador.....	12
2.2.2 Modelo do Hidrociclone.....	18
2.3 Simulação .....	23
Capítulo 3: Diagnóstico de falhas.....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Classificação dos algoritmos de diagnóstico.....	33
Capítulo 4: Sistemas a Eventos Discretos.....	36
4.1 Introdução.....	36
4.2 Linguagem.....	37
4.2.1 Linguagem para sistemas a eventos discretos.....	37
4.2.2 Operações com linguagens.....	38
4.3 Autômatos.....	40
4.4 Diagnose de Falhas baseado em SED.....	45
4.5 Diagnosticador.....	46
4.5.1 Diagnose centralizada.....	47
Capítulo 5: Projeto dos diagnosticadores.....	50
5.1 Introdução.....	50
5.2 Falhas na planta.....	51
5.3 Projeto dos diagnosticadores.....	51

5.3.1 Modelagem do processo.....	52
5.3.1.1 Válvulas.....	52
5.3.1.2 Controladores.....	54
5.3.1.3 Modelo da planta.....	58
5.3.2 Construção do modelo com mapas de sensores.....	59
5.3.2.1 Introdução.....	59
5.3.2.2 Modelo com mapas de sensores.....	60
5.3.3 Diagnosticadores.....	66
5.3.4 Gerador de eventos.....	67
5.4 Simulações e resultados.....	70
5.4.1 Falhas na válvula de óleo.....	71
5.4.2 Falhas na válvula de gás.....	76
5.4.3 Falhas na válvula de água.....	80
5.4.4 Falhas na válvula de razão de pressão.....	85
5.4.5 Processo com distúrbio na entrada (golfadas).....	89
Capítulo 6: Conclusão e trabalhos futuros.....	99
Referências Bibliográficas.....	101

# Lista de figuras

Figura 1.1 – FPSO BW Cidade de São Vicente e FPSO Cidade Angra dos Reis.....	2
Figura 1.2 – Fluxograma básico de processo de uma plataforma FPSO.....	3
Figura 2.1 – Unidade de Separação.....	9
Figura 2.2 – Separador trifásico.....	10
Figura 2.3 – Desenho esquemático de um hidrociclone.....	12
Figura 2.4: Estrutura interna do vaso separador devido à presença da chicana.....	13
Figura 2.5: Esquema hidrodinâmica do hidrociclone.....	19
Figura 2.6: Bateria com 3 hidrociclones.....	20
Figura 2.7: Esquema de controle do separador com 3 hidrociclones.....	21
Figura 2.8: Respostas das variáveis controladas da unidade de separação a variações nos setpoints.....	25
Figura 2.9: Respostas das variáveis manipuladas da unidade de separação a variações nos setpoints.....	25
Figura 2.9: Respostas das variáveis manipuladas da unidade de separação a variações nos setpoints.....	26
Figura 2.11: Respostas das variáveis manipuladas da unidade de separação a variações no fluxo de alimentação.....	27
Figura 3.1: Relação falha-sintoma.....	29
Figura 3.2: Esquema de um diagnosticador genérico.....	29
Figura 3.3: Classificação dos algoritmos de diagnósticos.....	33

Figura 4.1: Autômato simples.....	40
Figura 4.2: Exemplo de autômato.....	41
Figura 4.3: Autômato rotulador.....	47
Figura 4.4: Autômato $G$ (a); Composição paralela entre $G$ e $A_l$ (b); $G_d = Obs(G  A_l)$ (c).....	48
Figura 5.1: Autômato da válvula.....	54
Figura 5.2: Sensor Virtual de condição do nível de óleo.....	55
Figura 5.3: Autômato do controlador.....	57
Figura 5.4: Autômato de Moore.....	59
Figura 5.5: Autômato de Mealy.....	60
Figura 5.6: Conversão de autômato.....	60
Figura 5.7: Gerador de eventos nl-, nl+, nh-, nh+.....	66
Figura 5.8: Bloco concatenação da Figura 5.7.....	66
Figura 5.9: Bloco gerador dos eventos fp,ap,at,ft.....	67
Figura 5.10: Bloco que concatena os eventos com os do sensor virtual.....	68
Figura 5.11: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	70
Figura 5.12 Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	71
Figura 5.13: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	72
Figura 5.14: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	73
Figura 5.15: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	74

Figura 5.16: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	75
Figura 5.17: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	76
Figura 5.18: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	77
Figura 5.19: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	79
Figura 5.20: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	80
Figura 5.21: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	81
Figura 5.22: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	82
Figura 5.23: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	83
Figura 5.24: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	84
Figura 5.25: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	85
Figura 5.26: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	86
Figura 5.27: Golfadas de entrada.....	87
Figura 5.28: Variáveis manipuladas.....	88
Figura 5.29: Variáveis controladas.....	88
Figura 5.30: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	89

Figura 5.31: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	90
Figura 5.32: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	91
Figura 5.33: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	92
Figura 5.34: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	93
Figura 5.35: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	94
Figura 5.36: Variáveis manipuladas (a); Variáveis controladas (b).....	95
Figura 5.37: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão.....	96

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros da unidade de separação.....	22
Tabela 2.2: Parâmetros dos controladores.....	24
Tabela 5.1: Descrição dos estados do autômato válvula.....	53
Tabela 5.2: Descrição dos eventos do autômato válvula.....	53
Tabela 5.3: Descrição das saídas do sensor virtual.....	56
Tabela 5.4: Descrição dos estados do autômato controlador de nível.....	56
Tabela 5.5: Descrição dos eventos do autômato controlador de nível.....	57
Tabela 5.6: Autômato da planta.....	58
Tabela 5.7: Mapa de sensores do diagnosticador da válvula de pressão do gás e do diferencial de pressão do hidrociclone.....	62
Tabela 5.8: Mapa de sensores do diagnosticador das válvulas de óleo e da válvula de água.....	63
Tabela 5.9: Autômato da planta com o mapa de sensores de pressão.....	64
Tabela 5.10: Autômato da planta com o mapa de sensores de nível.....	65
Tabela 5.11: Diagnosticador de falhas das válvulas de água e óleo.....	66
Tabela 5.12: Diagnosticador de falhas das válvulas de gás e de diferencial de pressão.....	67

# Lista de Abreviaturas

FPSO - Floating production storage and offloading

UPGN – Unidade de Processamento de Gás Natural

FDD – Detecção e Diagnóstico de Falhas

SED – Sistemas a Eventos Discretos

NUEX - Núcleo Experimental Engenheiro Baruzzi

UFS - Universidade Federal de Sergipe

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CUSUM – Cumulative Sum Control Chart

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello

GTST - Goal Tree – Sucess Tree

FTAES - Fault Tree Analysis Expert Systems

PID – Proporcional – Integrativo – Derivativo

PPM – Partes Por Milhão

DC - Deoiler Cyclone

CCD - Compact Cyclone Degasser

BOW - Bulk Oil-Water Cyclone

PDC - Pre Deoiler Cyclone

CS - Câmara de Separação

CL – Câmara de óleo

$C_{CS}$  – comprimento da câmara de separação

$C_{Cl}$  – comprimento da câmara de óleo

$D$  – diâmetro do separador

$h_t$  – nível total na câmara de separação

$W_{in}$  – vazão de entrada da fase aquosa

$L_{in}$  – vazão de entrada da fase oleosa

$h_{chic}$  – altura da chicana,

$C_{chic}$  – comprimento da chicana

$Cv_{maxg}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de gás

$Cv_{maxw}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de água

$Cv_{maxl}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de óleo

$d_g$  - densidade específica do gás

$d_l$  - densidade específica do óleo

$d_w$  - densidade específica da água

$MW_g$  - peso molecular do gás

$p_{comp}$  - pressão da unidade de compressão, após a válvula de gás

$p_{jus}$  - pressão a jusante das válvulas de óleo e água

$R$  - constante dos gases

$T$  - temperatura da carga

$\gamma_l$  - peso específico do óleo

$\gamma_w$  - peso específico da água

BSW – concentração de água na fase oleosa

EFLW – eficiência na separação de óleo da fase aquosa

EFWL – eficiência na separação da água da fase oleosa

TOG – concentração volumétrica de óleo

$V_{wflcs}$  – volume de água na fase oleosa da câmara de separação

$x_{wflcs}$  – fração volumétrica da água na fase oleosa da câmara de separação

$V_{lfwcs}$  – volume de óleo na fase aquosa na câmara de separação

$x_{lfwcs}$  – fração volumétrica de óleo na fase aquosa na câmara de separação

$V_{wflcl}$  – volume de água na fase oleosa da câmara de óleo

$x_{wflcl}$  – fração volumétrica de água na fase oleosa da câmara de óleo

$V_t$  – volume total do vaso

$V_{cs}$  – volume total da câmara de separação

$V_{cl}$  – volume total da câmara de óleo

$W_o$  – vazão na linha superior do processo

$W_u$  – vazão na linha de fundo do hidrociclone

$\Delta P_o$  – diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a corrente de descarga superior do hidrociclone

$\Delta P_u$  – diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a corrente de descarga inferior do hidrociclone

$S_o$  – abertura da válvula de topo

$S_u$  – abertura da válvula de fundo

$Cv_{max,o}$  – coeficiente de descarga máximo da válvula de topo

$Cv_{max,u}$  – coeficiente de descarga máximo da válvula de fundo

$\alpha_1$  – parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga

$\alpha_2$  – parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga

$P_o$  – pressão na descarga da linha de topo

$P_u$  – pressão na descarga da linha de fundo

$P_l$  – pressão na alimentação do hidrociclone

DPR - razão de perdas de carga

$\tau_i$  – constante de tempo integral

$k_c$  – ganho proporcional do controlador

$T_s$  – tempo de amostragem

$u(k)$  – sinal de controle

$e(k)$  – sinal de erro atuante

EKF – Estimação por Filtro de Kalman

PCA – Análise por Componentes Principais

PLS – Mínimos Quadrados Parciais

QTA – Análises de Tendências Qualitativas

SDVC - Sistemas Dinâmicos de Variáveis Contínuas

# Capítulo 1

## Introdução

Do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), o petróleo no estado líquido é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro. Há registros de sua utilização nos primórdios da humanidade por civilizações como egípcios, babilônicos, gregos e romanos.

No Brasil, a história do petróleo tem início em 1858, quando o Marquês de Olinda concede a José Barros Pimentel o direito de extrair mineral betuminoso para fabricação de querosene na então província da Bahia. A partir de 1954, no governo Vargas, foi instituído o monopólio estatal do petróleo, com a criação da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.), que deu partida decisiva nas pesquisas e produção do petróleo brasileiro.

Nos últimos anos, as reservas brasileiras de petróleo e gás incrementaram-se consideravelmente com a descoberta de vários reservatórios no mar, principalmente na Bacia de Campos. Isso levou a PETROBRAS a investir fortemente em plataformas “offshore” de petróleo, tornando-se líder mundial na exploração e produção de petróleo em águas profundas e ultraprofundas. Nos 100 mil quilômetros quadrados da Bacia de Campos, a PETROBRAS tem hoje aproximadamente 40 unidades de produção de petróleo, operando 546 poços, com uma produção média diária de 1 milhão e 265 mil barris, o que faz do Brasil autossuficiente na produção de petróleo para seu consumo interno.

Mais recentemente, a descoberta de petróleo na região da Província do Pré-sal nas bacias do Sul e Sudeste do Brasil representou um marco na história da PETROBRAS. A avaliação do potencial petrolífero dessa área indica volumes de óleo e gás que, se confirmados, elevarão significativamente as reservas da

companhia, colocando-a no grupo de empresas e países com grandes reservas de petróleo. A província do pré-sal possui cerca de 800 quilômetros de extensão e 200 quilômetros de largura, e vai desde o litoral do Espírito Santo até Santa Catarina. A primeira área avaliada, Tupi, possui volumes estimados entre 5 e 8 bilhões de barris, o que a classificaria como o maior campo de petróleo descoberto no mundo desde 2000. As estimativas apontam que Tupi pode aumentar em mais de 50% as reservas da PETROBRAS.

Para acompanhar todo esse crescimento, tendo em vista os volumes de produção envolvidos e o porte das instalações que se fazem necessárias, a estrutura “offshore” da PETROBRAS deverá aumentar. Serão dezenas de novas plataformas de produção em conjunto com grandes investimentos na automação dos seus processos. A título de ilustração, são mostrados na figura 1.1 as imagens das plataformas flutuantes de produção, armazenamento e descarga (FPSO) BW Cidade de São Vicente e FPSO Cidade Angra dos Reis, respectivamente, operando no Campo de Tupi, na Bacia de Campos. As Plataformas FPSO são as mais utilizadas atualmente e comandarão a produção na Província do Pré-sal.



Figura 1.1 – FPSO BW Cidade de São Vicente e FPSO Cidade Angra dos Reis

O petróleo como encontrado na natureza é, na verdade, uma mistura composta, geralmente, de óleo, gás e água, além de impurezas, com graus diferentes de dispersão entre as fases. A separação desta mistura faz-se necessária, pois além do relevante interesse econômico nas frações de óleo e

gás, a água, um dos contaminantes mais indesejados no processo de produção do petróleo, apresenta elevado teor de sal em sua composição, provocando uma série de problemas no sistema de bombeio e transferência e na operação dos processos nas refinarias (Figueiredo, 2005).

O tratamento primário do petróleo extraído das jazidas marítimas consiste na separação do óleo, gás e água, sob condições controladas, no tratamento ou condicionamento do óleo e do gás para que possam ser transferidos para as refinarias e para as unidades de processamento de gás natural (UPGN), respectivamente, onde é efetuado o processamento propriamente dito, e no tratamento da água para reinjeção no poço ou descarte no mar. Todos estes processos são realizados nas plataformas FPSO com a ajuda de equipamentos básicos como mostrados na figura 1.2.

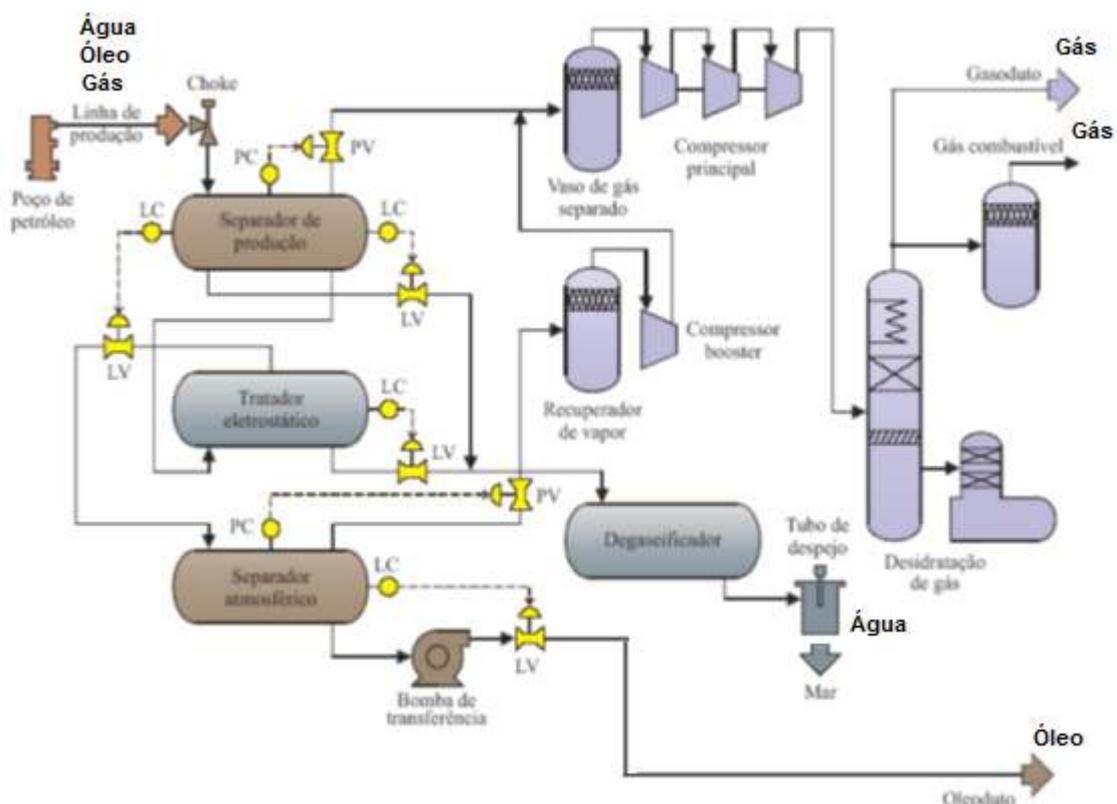


Figura 1.2 – Fluxograma básico de processo de uma plataforma FPSO

Um dos elementos principais de uma plataforma “offshore” de petróleo é a unidade de separação ou separador de produção. A interligação direta desta unidade aos poços de produção faz dela responsável por absorver as flutuações

(golfadas) da corrente de alimentação como também promover a separação da mistura trifásica água-óleo-gás.

Nesse contexto, surge a necessidade de se lidar com prováveis falhas no sistema. Falha é um termo geral usado para descrever um distúrbio significativo que leva um processo para um ponto longe da sua faixa normal de operação e onde um sistema de controle não pode regular eficientemente o processo e, se esta situação não é corrigida por uma ação adequada, a operação pode entrar numa situação emergencial que pode levar a consequências catastróficas (Raman, 2005). Em tais circunstâncias, e com o objetivo de fazer a correção efetiva da falha, o operador da planta precisa efetuar uma complexa e rápida tomada de decisões, tais como detecção de falhas, identificação das origens destas falhas, suas magnitudes e impacto sobre o sistema, e planificar as ações corretivas e reparos a serem efetuados. No entanto, na prática, estas tarefas não são fáceis de realizar, principalmente devido ao tamanho e complexidade das modernas plantas industriais, e ao sobrecarregado e igualmente contraditório fluxo de informações que o operador deve manejar. Como resultado, nenhuma tomada de decisão é efetuada, ou se efetuada, esta pode ser realizada de forma inadequada, podendo gerar queda repentina do sistema com graves consequências econômicas, desastres no meio ambiente e possíveis perdas de vidas humanas (Hamad, 2006).

Processos de produção de petróleo “offshore” têm uma larga lista de trágicos acidentes em todo o mundo. Na pior destas catástrofes, a explosão da Piper Alpha da Occidental Petroleum, na Escócia, em 1988, deixou 167 pessoas mortas e mais de 2 bilhões de dólares em perdas, após um vazamento de gás. No Brasil, o mais grave acidente ocorreu em 2001, com a explosão e afundamento da plataforma P-36 da PETROBRAS (considerada, até então, a maior plataforma de produção de petróleo do mundo), instalada no campo de Roncador, a 120 km da costa, na Bacia de Campos, que provocou a morte de 11 pessoas e grandes perdas econômicas e ambientais. Só a plataforma estava orçada em 500 milhões de dólares.

Estas tragédias representam casos extremos dentro do espectro de grandes acidentes em plataformas de petróleo. No entanto, acidentes menores são muito comuns no dia-a-dia com consequências econômicas e ambientais

significativas. Um estudo realizado pela Health and Safety Executive (Khan e Amyotte, 2002) mostrou que as maiores fontes de acidentes em instalações “offshore” são: falhas no processo (39%), falhas na estrutura da plataforma (23%) e transporte de fluidos (22%). Outro estudo similar realizado pela Marsh’s Risk Consulting Practice (Coco, 2003), apontou falhas nos equipamentos (38%) e erros humanos (34%) como as maiores causas de acidentes em plataformas “offshore” situados no Golfo do México.

No caso do acidente da P-36, a análise da comissão investigadora ANP/DPC recomendou que “os planos de contingência para acidentes de grande proporção e os esquemas de respostas a emergências de grande risco necessitam ser imediatamente aprimorados, bem como a revisão de critérios de projetos de engenharia em unidades flutuantes de produção para assegurar maior proteção intrínseca”. De acordo com esta recomendação, é claro que a aplicação de sistemas FDD em plataformas “offshore” necessita ser levado em consideração.

Nesse contexto, a presente dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema automático de detecção e diagnóstico de falhas (FDD) para uma unidade de separação trifásica água-óleo-gás, como parte central de um sistema inteligente de suporte operacional de processos de tratamento primário de petróleo em plataformas típicas de produção “offshore”. O sistema FDD será baseado na teoria existente de Sistemas a Eventos Discretos (SED) (Cassandras e Lafortune, 1999; Sampath et al., 1996) em detecção e diagnóstico de falhas para sistemas modelados por autômatos.

O processo em estudo baseia-se principalmente em simulações realísticas do projeto real de uma plataforma de produção da PETROBRAS, que encontra-se em operação no campo de Marlin na Bacia de Campos (Nunes, 1994). É necessário observar que o presente trabalho não pretende apresentar o sistema FDD pronto para ser instalado em uma plataforma de petróleo. Os resultados apresentados aqui são parte de um estudo inicial visando determinar uma solução e fornecer subsídios para a implementação de um sistema real, programada, se for o caso, para uma etapa posterior do projeto.

O objetivo principal do trabalho pode ser discriminado nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver o sistema FDD para uma unidade de separação água-óleo-gás típico, usado em plataformas marítimas da PETROBRAS. O sistema FDD deverá ser capaz de detectar, isolar e identificar falhas na operação da unidade.
- Demonstrar, mediante simulações, o desempenho do sistema FDD frente a possíveis falhas no processo, nos sensores e nos atuadores da unidade de separação.

O trabalho conforme proposto insere-se dentro dos objetivos do Projeto AIPetro “Automação Inteligente de Processos Petroquímicos”, financiado pela PETROBRAS, sendo desenvolvido em cooperação entre a Universidade Federal de Sergipe (UFS), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Núcleo Experimental Engenheiro Baruzzi (NuEx) do CENPES/PETROBRAS.

Existem muito poucos trabalhos de aplicação de sistemas FDD em processos de separação de petróleo, dentre os existentes, a maioria emprega métodos qualitativos ou analíticos.

Dentre os métodos qualitativos, Teixeira (1993) utiliza o teste de somas cumulativas (CUSUM), bastante conhecido na área de controle estatístico de processos, para detecção de falhas em um processo de separação bifásica óleo-gás, enquanto que o diagnóstico é realizado através de uma decomposição hierárquica do processo em uma árvore de objetivos e sub-objetivos a serem alcançados, conhecida como estrutura GTST (“Goal Tree – Sucess Tree”). Kaszkurewicz et al. (1997) desenvolveram um sistema FDD baseado na arquitetura FTAES (“Fault Tree Analysis Expert Systems”) para supervisionar o desempenho das unidades de uma plataforma. No entanto, segundo os autores, tentativas de aplicar a arquitetura FTAES à unidade de separação não se mostram eficientes, pois os modelos baseados simplesmente em regras não foram capazes de capturar a dinâmica complexa do separador, sendo necessária a aplicação de técnicas FDD analíticas que fazem uso de um modelo do processo. Rivera (2007) usa a teoria existente de SED em detecção e

diagnóstico de falhas para sistemas modelados por redes de Petri, para propor um sistema FDD para um processo de separação bifásica óleo-gás.

No caso dos métodos analíticos, Reider (2002) desenvolve um sistema FDD para a instrumentação de um separador bifásico óleo-gás, no qual os resíduos são obtidos com o auxílio de um modelo não-linear do processo, os quais são avaliados usando uma versão melhorada do método CUSUM. Omana e Taylor (2007) usam um modelo identificado de um separador trifásico água-óleo-gás para projetar um sistema FDD para falhas em sensores e atuadores baseado na técnica de vetores de paridade generalizada. Nwachukwu (2007) apresenta uma técnica para acomodar falhas no transmissor de nível de um separador bifásico óleo-água. A técnica proposta usa informações de um sistema FDD baseado em redundância analítica para reconstruir o sinal do sensor defeituoso, os quais são usados por um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) ao invés das medições defeituosas. Finalmente, Santana (2009) usa observadores com entradas desconhecidas para o projeto de um sistema FDD para a unidade de separação trifásica similar ao usado no presente trabalho.

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte forma. No capítulo 2 apresentamos uma descrição do processo de separação trifásica água-óleo-gás e do modelo de simulação da unidade de separação que será usado no desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 3 apresenta um apanhado geral da teoria de diagnóstico de falhas, detalhando os tipos de diagnósticos e suas classificações. O capítulo 4 trata da teoria geral de SED, mostrando detalhes de linguagens de autômatos. Esta teoria será a base para o desenvolvimento do sistema FDD para a unidade de separação. No capítulo 5 é apresentada a metodologia detalhada do projeto dos diagnosticadores e os resultados obtidos com sua aplicação no processo de separação trifásica. Conclusões e trabalhos futuros são apresentados no capítulo 6.

# Capítulo 2

## A Unidade de Separação Água-Óleo-Gás

Nos sistemas de produção marítima de petróleo, os poços de produção podem ser conectados diretamente às plataformas “offshore” ou por meio de “manifolds” que centralizam vários poços e encaminham uma única linha de produção para a plataforma. Nessa, o tratamento primário inicia-se na unidade de separação, que é basicamente um vaso separador bifásico, para separação líquido-gás, ou trifásico, para separação água-óleo-gás.

Os separadores são fabricados nas formas vertical ou horizontal, sendo os separadores horizontais normalmente os mais eficientes. Por possuírem uma maior área superficial de interface permitindo uma melhor separação das fases. Separadores horizontais são utilizados, principalmente, em sistemas que apresentem espumas e altas razões gás/óleo. As desvantagens do separador vertical em relação ao horizontal referem-se ao manuseio dos sólidos produzidos e à menor capacidade de absorver grandes variações de fluxo de alimentação (golfadas). O separador trifásico considerado neste trabalho é o horizontal.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Na seção 2.1 apresentamos o esquemático da unidade de separação com detalhes do funcionamento do processo. A seção 2.2 apresenta o modelo matemático do processo de separação trifásica. A seção 2.3 trata dos detalhes do sistema de controle aplicado ao processo e dos resultados de simulações realizados.

## 2.1 – Unidade de Separação

A unidade de separação considerada neste estudo é formada por um vaso separador trifásico em série com uma bateria de três hidrociclones, como mostrado na figura 2.1. O vaso separador trifásico é responsável por promover a separação adequada das fases aquosa, oleosa e gasosa, além de absorver as flutuações da corrente de alimentação (devido ao fenômeno das golfadas do escoamento multifásico). Os hidrociclones são importantes uma vez que a água separada do óleo não pode ser jogada diretamente ao mar, pois contém um nível residual de óleo acima dos padrões especificados para o seu descarte, podendo alcançar valores da ordem de 50% em volume. Esta água precisa ser tratada para condicioná-la ao descarte ou reinjeção, e recuperar parte do óleo nela presente na forma de emulsão. A seguir apresentaremos uma descrição mais detalhada desses elementos.

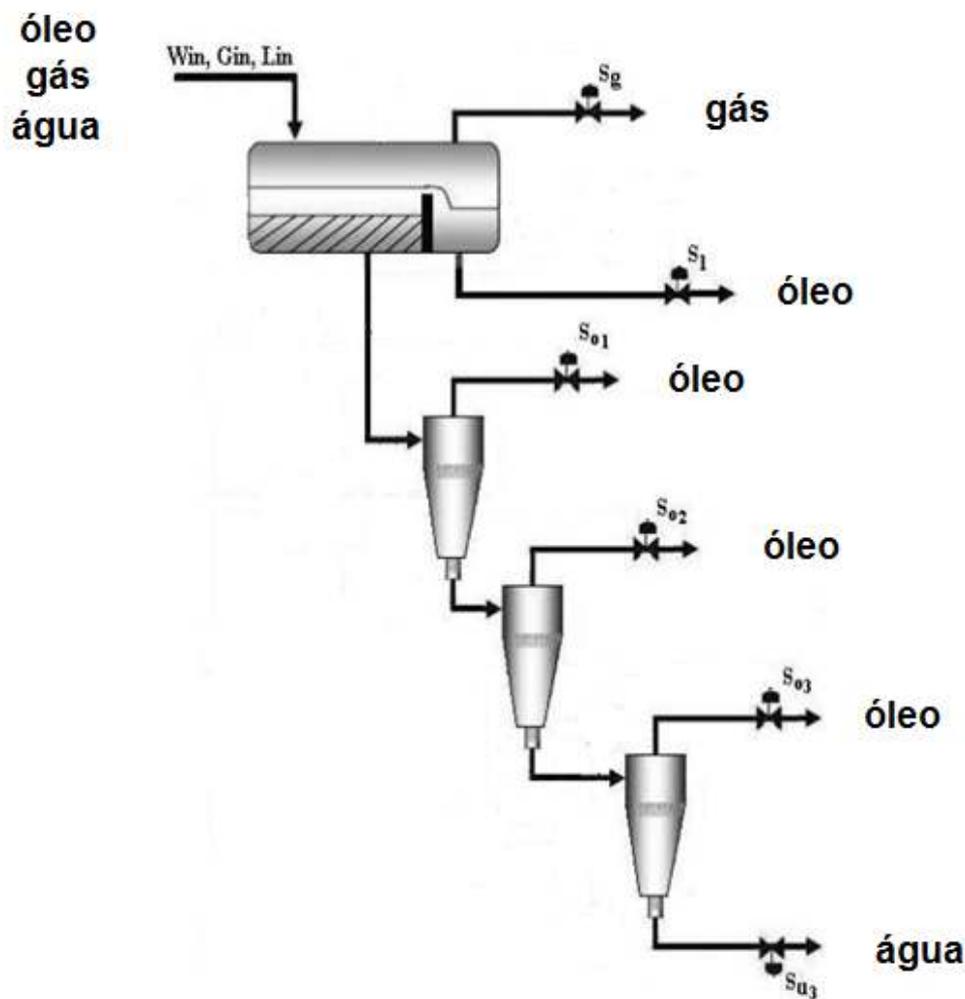


Figura 2.1 – Unidade de Separação (Silveira, 2006).

## 2.1.1 – Vaso separador

O separador trifásico, também conhecido na indústria de petróleo como separador de produção, exerce também a função de tanque pulmão (*surge tank*), recebe uma vazão flutuante e fornece aos equipamentos à jusante uma vazão mais estável para não comprometer sua operação.

O vaso separador tem um formato cilíndrico horizontal, projetado para trabalhar a temperaturas e pressões em torno de 90°C e 10kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente. É composto de duas seções denominadas câmara de separação e câmara de óleo, ambas separadas por um vertedouro (veja figura 2.2).

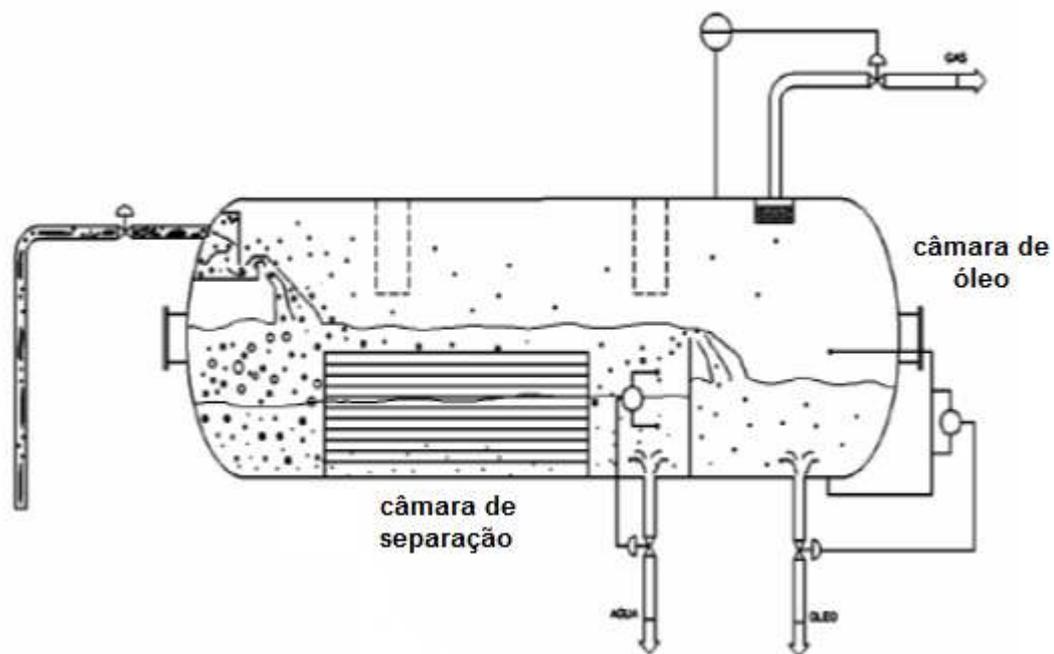


Figura 2.2 – Separador trifásico (Nunes, 2001)

Neste equipamento, a força gravitacional promove a segregação das fases na câmara de separação formando-se uma fase rica em água, uma fase rica em óleo e uma interface entre ambas as fases. Os líquidos fluem na direção do vertedouro e, ao longo deste caminho, pratos paralelos ajudam na separação líquido-líquido. A fase rica em óleo transborda sobre o vertedouro para a câmara de óleo e, daí, ela é transferida até os tratadores, que retiram sais e resíduos da

água. O gás, já separado do óleo e da água é canalizado para compressores sendo, então, direcionado a uma planta de tratamento, onde a umidade é retirada. A fase rica em água é encaminhada à unidade de tratamento, neste caso o hidrociclone, para redução de resíduos de óleo nos padrões especificados para seu descarte ou re-injeção.

## 2.1.2 – Hidrociclone

O tratamento de água para condiciona-la ao descarte ou reinjeção e recuperar parte do óleo presente nela na forma de emulsão é realizado em uma bateria de 3 hidrociclones onde são retiradas as gotículas restantes de óleo, atingindo a níveis de aproximadamente 200 ppm (partes por milhão) para posterior tratamento em flotadores, atingindo valores abaixo de 20 ppm de teor de óleo graxo, podendo ser descartada ao mar.

O hidrociclone é um equipamento constituído de um tubo composto de trechos cilíndricos e cônicos justapostos que efetua a separação da fase dispersa pela ação de um campo centrífugo resultante, pela configuração do equipamento e pelo modo com que a suspensão o alimenta. O princípio de operação deste equipamento consiste na entrada tangencial de água oleosa, sob pressão, no trecho de maior diâmetro, sendo direcionada internamente, em fluxo espiral, em direção ao trecho de menor diâmetro. O decréscimo de diâmetro faz com que este fluxo seja acelerado, gerando uma força centrífuga que força o componente mais pesado (água) contra as paredes. O diagrama esquemático de um hidrociclone pode ser observado na figura 2.3.

No tratamento da fase aquosa utiliza-se uma bateria de hidrociclones que surgiu por volta de 25 anos atrás, através de pesquisas realizadas na Inglaterra. Conhecidos como DC (*Deoiler Cyclone*), foi projetado para tratar misturas aquosas de efluentes com menos de 2000 ppm (partes por milhão). Tempos depois, uma empresa da Noruega (Kvaerner) introduziu três novos tipos de hidrociclones que poderiam ser utilizado em sequência no tratamento da mistura proveniente dos poços.

O primeiro tipo de hidrociclone tem como objetivo a separação das fases líquidas e gasosas do petróleo vindo do poço. É conhecido pela sigla CCD

(*Compact Cyclone Degasser*). O segundo tipo, conhecido como BOW (*Bulk Oil-Water Cyclone*), busca levar uma corrente com 15%-50% de óleo a um teor de, no máximo, 15% de óleo. O terceiro tipo, o PDC (*Pre Deoiler Cyclone*), é projetado para receber essa corrente com, no máximo, 15% de óleo, tratá-la até um teor de óleo da ordem de 1500ppm. Esta corrente estaria pronta para ser tratada pelo “tradicional” DC anteriormente mencionado.

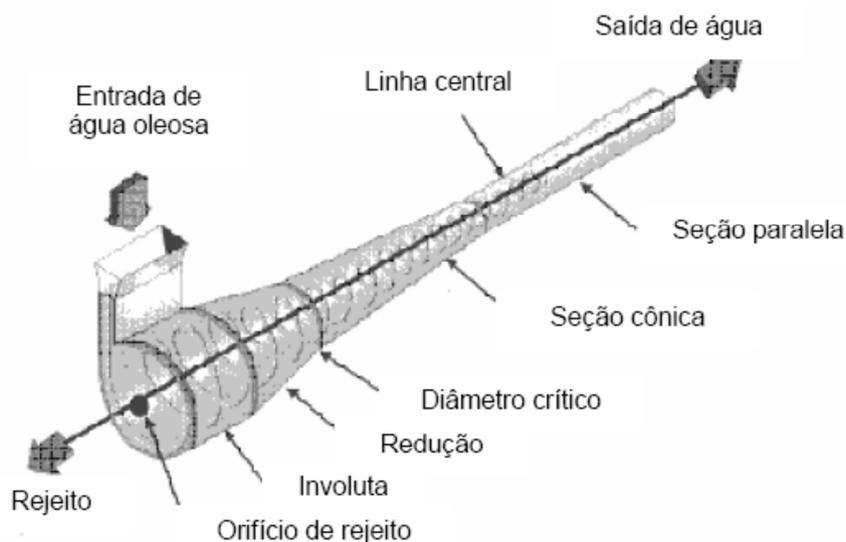


Figura 2.3 – Desenho esquemático de um hidrociclone (Triggia et al, 2001)

## 2.2 – Simulador da unidade de separação

O simulador da unidade de separação usado neste trabalho é baseado em modelos fenomenológicos para o vaso separador e para os hidrociclones, os quais serão resumidamente mostrados a seguir.

### 2.2.1 – Modelo do vaso separador

Para o vaso separador, usa-se um modelo dinâmico simplificado de conservação de massa proposto por Nunes (2001, 2007) com sete estados.

Considerando a estrutura interna do vaso separador conforme mostrado na figura 2.4, do modelo de Nunes (2001, 2007). Observe a distinção entre a

câmara de separação (CS) e a câmara de óleo (CL). Na figura 2.4  $W_{in}$ ,  $L_{in}$  e  $G_{in}$  representam a vazão de entrada de água, óleo e gás respectivamente. A fase oleosa representa todo o líquido acima da interface, ou seja, óleo mais água emulsionada. A fase aquosa corresponde à água e o óleo disperso nela.

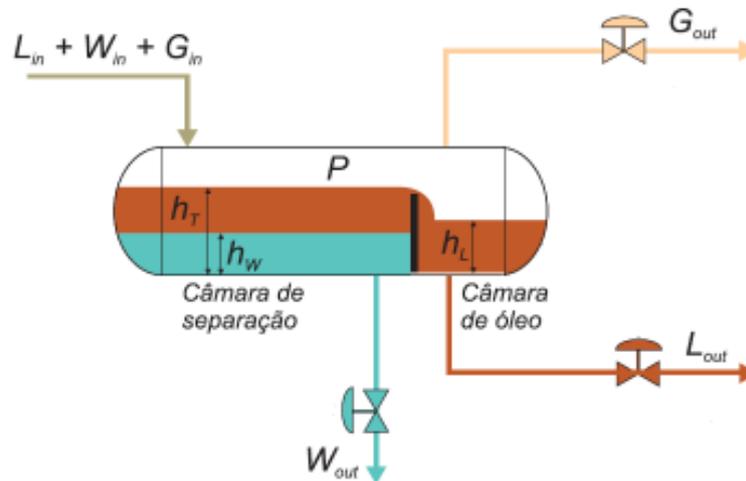


Figura 2.4: Estrutura interna do vaso separador devido à presença da chicana (Nunes, 2007)

Para este sistema tem-se (Nunes, 2007):

- Variação da altura total na câmara de separação:

$$\frac{dh_t}{dt} = \frac{W_{in} + L_{in} - W_{weir} - W_{out}}{2 \cdot C_{CS} \cdot \sqrt{h_t(D - h_t)}}, \quad (2.1)$$

- Variação da altura da fase oleosa na câmara de óleo:

$$\frac{dh_l}{dt} = \frac{L_{weir} - L_{out}}{2 \cdot C_{cl} \cdot \sqrt{h_l(D - h_l)}}, \quad (2.2)$$

sendo:  $C_{CS}$  – comprimento da câmara de separação,

$C_{cl}$  – comprimento da câmara de óleo,

$D$  – diâmetro do separador,

$h_t$  – nível total na câmara de separação,

$W_{in}$  – vazão de entrada da fase aquosa,

$L_{in}$  – vazão de entrada da fase oleosa.

A vazão da fase oleosa por cima do vertedouro,  $L_{weir}$ , a vazão de saída da fase oleosa da câmara de óleo,  $L_{out}$ , a vazão de saída da água da câmara de separação,  $W_{out}$  e a vazão de saída do gás,  $G_{out}$  são dadas por:

$$L_{weir} = \frac{110,2046}{60} [C_{chic} - 0,2(h_t - h_{chic})] \cdot (h_t - h_{chic})^{1,5}, \quad (2.3)$$

$$L_{out} = \frac{Cv_{maxl} \cdot s_l \sqrt{d_l(p - p_{jus}) + \gamma_l \cdot h_l}}{0,0693 \cdot 60 \cdot \rho_{fl}}, \quad (2.4)$$

$$W_{out} = \frac{Cv_{maxw} \cdot s_w \sqrt{d_w(p - p_{jus}) + \gamma_w \cdot h_w + \gamma_l(h_t - h_w)}}{0,0693 \cdot 60 \cdot \rho_{fw}}, \quad (2.5)$$

$$G_{out} = \frac{Cv_{maxg} \cdot S_g \sqrt{d_g(p - p_{comp}) \cdot (p + p_{comp})}}{\frac{2,832 \cdot 60 \cdot p \cdot MW_g}{RT}}, \quad (2.6)$$

sendo:  $h_{chic}$  – altura da chicana,

$C_{chic}$  – comprimento da chicana,

$Cv_{maxg}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de gás,

$Cv_{maxw}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de água,

$Cv_{maxl}$  - coeficiente de descarga máximo da válvula de óleo,

$d_g$  - densidade específica do gás,

$d_l$  - densidade específica do óleo,

$d_w$  - densidade específica da água,

$MW_g$  - peso molecular do gás,

$p_{comp}$  - pressão da unidade de compressão, após a válvula de gás,

$p_{jus}$  - pressão a jusante das válvulas de óleo e água,

$R$  - constante dos gases,

$T$  - temperatura da carga,

$\gamma_l$  - peso específico do óleo,

$\gamma_w$  - peso específico da água,

Deve-se frisar que se  $h_t$  for menor que  $h_{chic}$ , a vazão no vertedouro será nula, e nesse caso  $L_{weir}$  será igual a zero.

- A variação da altura da fase aquosa na câmara de separação é dada por:

$$\frac{dh_w}{dt} = \frac{W_{in}(1 - TOG \cdot EFLW) - W_{out} + L_{in} \cdot BSW \cdot EFWL}{2 \cdot C_{CS} \cdot [\sqrt{h_w(D - h_w)}]}, \quad (2.7)$$

sendo: BSW – concentração de água na fase oleosa,

EFLW – eficiência na separação de óleo da fase aquosa,

EFWL – eficiência na separação da água da fase oleosa,

TOG – concentração volumétrica de óleo,

- Variação do volume de água na fase oleosa na câmara de separação:

$$\frac{dV_{wflcs}}{dt} = L_{in} \cdot BSW(1 - EFWL) - L_{weir} \cdot x_{wflcs}, \quad (2.8)$$

sendo:  $V_{wflcs}$  – volume de água na fase oleosa da câmara de separação,

$x_{wflcs}$  – fração volumétrica da água na fase oleosa da câmara de separação, que é dada por:

$$x_{wflcs} = \frac{V_{wflcs}}{(V_{cs} - V_{fwcs})} \quad (2.9)$$

Na equação (2.9),  $V_{cs}$  é o volume da câmara de separação e  $V_{fwcs}$  é o volume da fase aquosa na câmara de separação, que são dados por:

$$V_{cs} = \frac{C_{cs} \cdot D^2}{4} \left\{ \cos \left( 1 - 2 \frac{h_t}{D} \right) - \text{sen} \left[ a \cos \left( 1 - 2 \frac{h_t}{D} \right) \right] \cdot \cos \left[ a \cos 1 - 2 \frac{h_t}{D} \right] \right\}. \quad (2.10)$$

$$V_{fwcs} = \frac{C_{cs} \cdot D^2}{4} \left\{ \cos \left( 1 - 2 \frac{h_w}{D} \right) - \text{sen} \left[ a \cos \left( 1 - 2 \frac{h_w}{D} \right) \right] \cdot \cos \left[ a \cos 1 - 2 \frac{h_w}{D} \right] \right\}. \quad (2.11)$$

- Variação do volume de óleo na fase aquosa na câmara de separação:

$$\frac{dV_{lfwcs}}{dt} = W_{in} \cdot TOG(1 - EFLW) - W_{out} \cdot x_{lfwcs}, \quad (2.12)$$

sendo:  $V_{lfwcs}$  – volume de óleo na fase aquosa na câmara de separação,

$x_{lfwcs}$  – fração volumétrica de óleo na fase aquosa na câmara de separação dada por:

$$x_{lfwcs} = \frac{V_{lfwcs}}{V_{fwcs}} \quad (2.13)$$

- Variação do volume de água na fase oleosa na câmara de óleo

$$\frac{dV_{wflcl}}{dt} = L_{weir} \cdot x_{wflcs} - L_{out} \cdot x_{wflcl} \quad (2.14)$$

sendo:  $V_{wflcl}$  – volume de água na fase oleosa da câmara de óleo,

$x_{wflcl}$  – fração volumétrica de água na fase oleosa da câmara de óleo,  
que é dada por:

$$x_{wflcl} = \frac{V_{wflcl}}{V_{cl}}. \quad (2.15)$$

Na equação (2.15),  $V_{cl}$  é o volume da câmara de óleo que é dado por:

$$V_{cl} = \frac{C_{cl} \cdot D^2}{4} \left\{ \cos \left( 1 - 2 \frac{h_l}{D} \right) - \operatorname{sen} \left[ a \cos \left( 1 - 2 \frac{h_l}{D} \right) \right] \cdot \cos \left[ a \cos 1 - 2 \frac{h_l}{D} \right] \right\}. \quad (2.16)$$

- Variação da pressão do vaso:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(W_{in} + L_{in} + G_{in} - W_{out} - L_{out} - G_{out}) \cdot P}{V_t - V_{cs} - V_{cl}}, \quad (2.17)$$

sendo:  $V_t$  – volume total do vaso,

$V_{cs}$  – volume total da câmara de separação,

$V_{cl}$  – volume total da câmara de óleo.

Completa-se assim, o sistema de equações diferenciais ordinárias utilizadas na modelagem do separador trifásico gravitacional.

- Eficiência global de remoção de óleo da fase aquosa, EFLW (ou de água da fase oleosa, EFWL).

A eficiência é calculada em função do processo de deposição de gotículas na placa inferior (para gota de água), ou superior (para gota de óleo), quando a emulsão passa entre duas placas paralelas, separadas pela distância  $h_{placa}$ .

Neste trabalho considerou-se a eficiência constante e igual a 1, os cálculos necessários ao cálculo da eficiência podem ser encontrados em Filgueiras (2005).

## 2.2.2 – Modelo do Hidrociclone

O modelo do hidrociclone foi baseado em Filgueiras (2005). O modelo proposto tem a seguinte forma:

$$\Delta P_o = \alpha_1 \cdot W_o \quad (2.18)$$

$$\Delta P_u = \alpha_2 \cdot W_u \quad (2.19)$$

sendo:  $W_o$  – vazão na linha superior do processo,

$W_u$  – vazão na linha de fundo do hidrociclone,

$\Delta P_o$  – diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a corrente de descarga superior do hidrociclone

$\Delta P_u$  – diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a corrente de descarga inferior do hidrociclone.

É possível ainda demonstrar que:

$$W_o = \frac{Cv_{max,o} \cdot S_o}{\rho_{fl} \cdot 0,0693 \cdot 60} \sqrt{d_l(P_l - \Delta P_o - P_o)} \quad (2.20)$$

$$W_u = \frac{Cv_{max,u} \cdot S_u}{\rho_{fw} \cdot 0,0693 \cdot 60} \sqrt{d_w(P_l - \Delta P_u - P_u)} \quad (2.21)$$

sendo:  $S_o$  – abertura da válvula de topo,

$S_u$  – abertura da válvula de fundo,

$Cv_{max,o}$  – coeficiente de descarga máximo da válvula de topo,

$Cv_{max,u}$  – coeficiente de descarga máximo da válvula de fundo,

$\alpha_1$  – parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga,

$\alpha_2$  – parâmetro de ajuste do modelo para perda de carga,

$P_o$  – pressão na descarga da linha de topo,

$P_u$  – pressão na descarga da linha de fundo,

$P_l$  – pressão na alimentação do hidrociclone.

Substituindo as equações (2.18) e (2.19) nas equações (2.20) e (2.21), obtém-se equações do segundo grau, que podem ser facilmente resolvidas para a determinação das vazões de topo ( $W_o$ ) e fundo ( $W_u$ ).

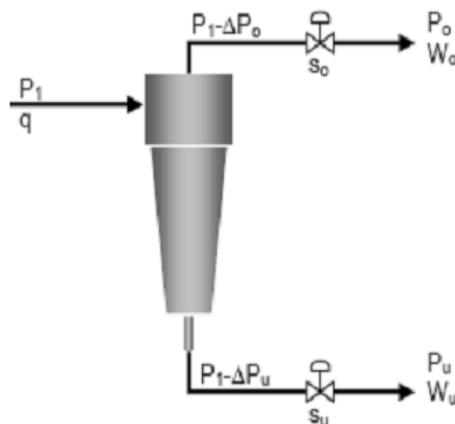


Figura 2.5: Esquema hidrodinâmico do hidrociclone (Figueiredo, 2010)

O modelo utilizado no simulador é uma composição de 3 hidrociclones dos tipos BOW, PDC e DC seguindo o mesmo modelo matemático conforme

apresentado nas equações (2.18), (2.19), (2.20) e (2.21), diferenciando-se somente na pressão da linha de entrada dos hidrociclones PDC e DC, que é a pressão da linha de saída inferior dos hidrociclones BOW e PDC, respectivamente, conforme esquematizado na figura 2.6.

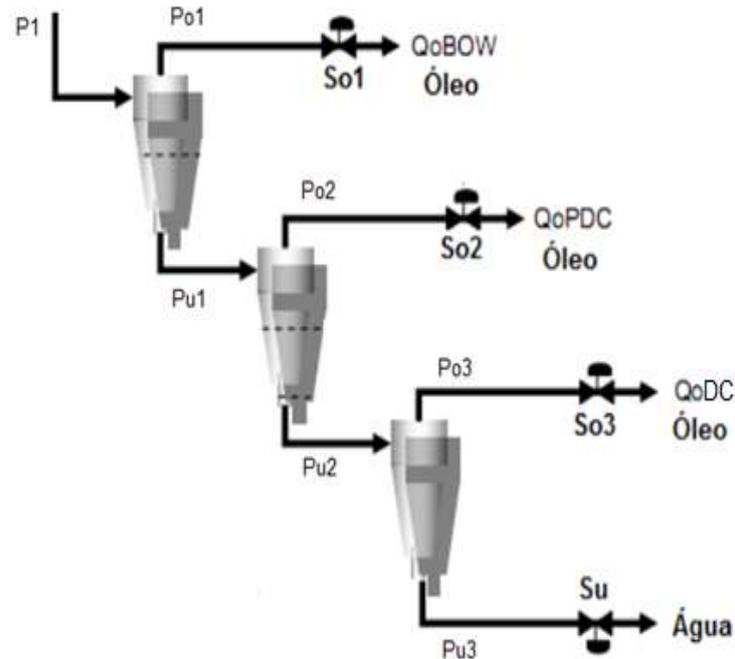


Figura 2.6: Bateria com 3 hidrociclones (adaptado de Silveira, 2006)

As válvulas de saída superior dos hidrociclones BOW e PDC são manipuladas para controlar o nível de água do separador, e não suas DPR's (razão de perdas de carga, em inglês  $\Delta P$  ratio), conforme ilustrado na figura 2.7. Assim, os controladores que manipulam as válvulas de saída superior dos hidrociclones BOW e do PDC e a de saída inferior do hidrociclone DC recebem o mesmo setpoint.

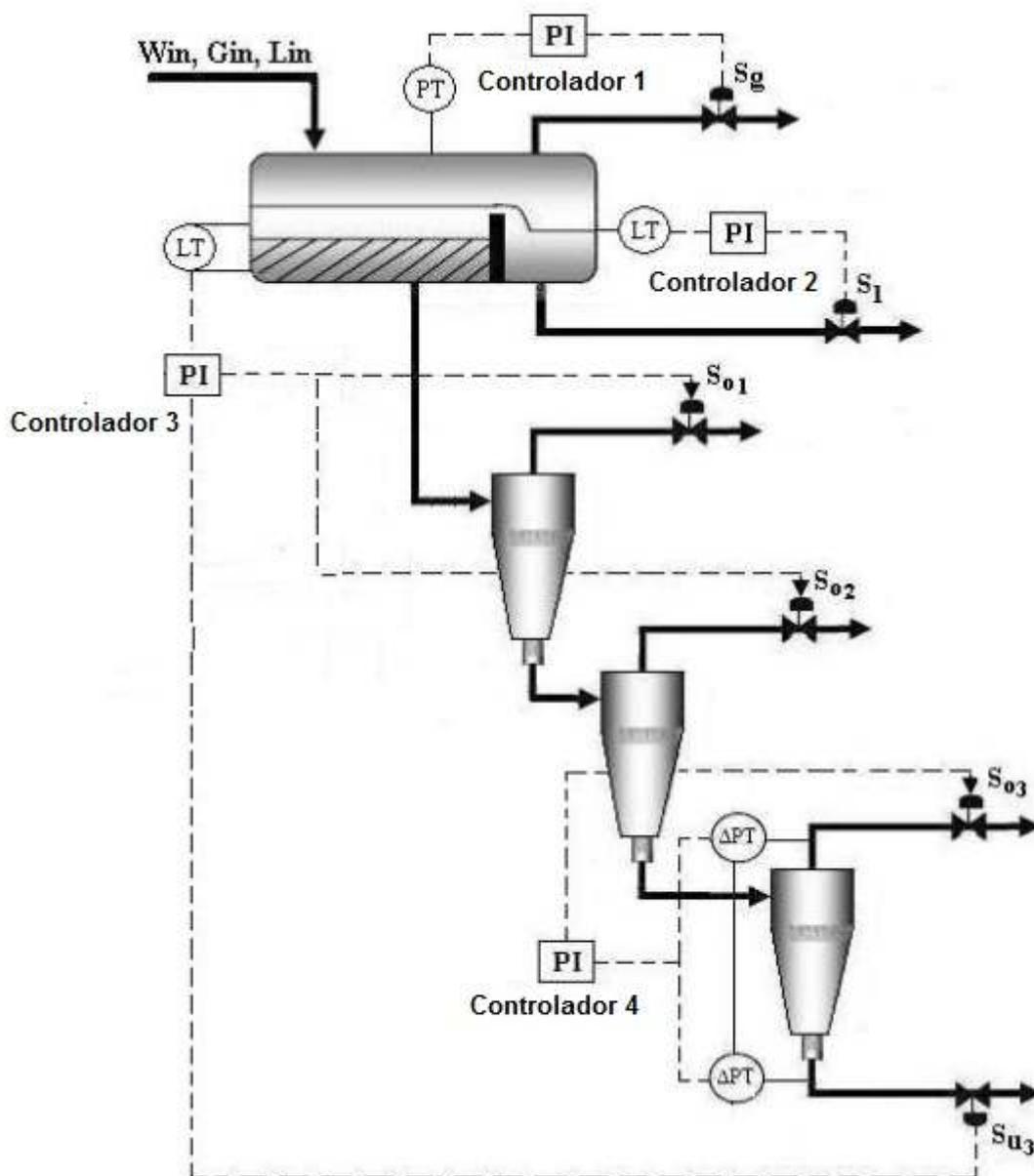


Figura 2.7: Esquema de controle do separador com 3 hidrociclones (modificado de Silveira, 2006)

O simulador foi implementado em ambiente Matlab/Simulink™ com os parâmetros listados na Tabela 2.1. Alguns destes dados, tais como dimensões e parâmetros físicos-químicos, foram tomados de uma plataforma real operando no Campo de Marlin, na Bacia de Campos, enquanto que outros dados, tais como vazões de entrada do separador e concentrações BSW e TOG na alimentação, foram arbitrados para reproduzir a operação normal do sistema (Filgueiras, 2005).

Tabela 2.1: Parâmetros da unidade de separação

SEPARADOR		
Parâmetro	Legenda	Valor
$C_{cs}$	Comprimento da câmara de separação	4,4 m
$C_{cl}$	Comprimento da câmara de óleo	1,0 m
$D$	Diâmetro do separador	1,8 m
$h_{chic}$	Altura da chicana	0,867 m
$C_{chic}$	Comprimento da chicana	0,9 m
PROCESSO		
Parâmetro	Legenda	Valor
$\rho_{fw}$	Massa específica de água	965 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{fi}$	Massa específica do óleo	855 kg/m <sup>3</sup>
$d_i$	Densidade específica do óleo	0,855
$d_w$	Densidade específica da água	0,965
$BSW$	Concentração de água na fase oleosa	0,1
$TOG$	Concentração volumétrica de óleo na fase aquosa na alimentação	0,13
$EFLW$	Eficiência na separação do óleo da fase aquosa	0,9994
$EFWL$	Eficiência na separação da água da fase oleosa	0,9292
$P_{jus}$	Pressão a jusante das válvulas de óleo e água	1 kgf/cm <sup>2</sup>
$ht$	Nível total na câmara de separação	0,9143
VÁLVULAS		
Parâmetro	Legenda	Valor
$C_{vmax\ l}$	Coefficiente de descarga máximo da válvula de óleo	44,43
$C_{vmax\ w}$	Coefficiente de descarga máximo da válvula de água	36,70
$C_{vmax\ g}$	Coefficiente de descarga máximo da válvula de gás	74,05
ENTRADAS		
Entrada	Legenda	Valor Inicial
$W_{in}$	Vazão de entrada da fase aquosa	0,0133 m <sup>3</sup> /s
$L_{in}$	Vazão de entrada da fase oleosa	0,0167 m <sup>3</sup> /s
$G_{in}$	Vazão de entrada da fase gasosa	0,1300 m <sup>3</sup> /s
VARIÁVEIS MANIPULADAS		
Variável	Legenda	Valor Inicial
$s_l$	Fração de abertura da válvula de óleo	0,5
$S_{01}$	Fração de abertura da válvula de óleo no BOW	0,5
$S_{02}$	Fração de abertura da válvula de óleo no PDC	0,5
$S_{03}$	Fração de abertura da válvula de óleo no DC	0,5
$S_u$	Fração de abertura da válvula de água no DC	0,5
$s_g$	Fração de abertura da válvula de gás	0,5
VARIÁVEIS CONTROLADAS		
Saída	Legenda	Valor Inicial
$h_l$	Altura da fase oleosa	0,4976 m
$h_w$	Valor inicial da altura da fase aquosa	0,4931m
$P$	Valor inicial da pressão no separador	9,4806 kgf/cm <sup>2</sup>
$R$	Razão da diferença de pressão do hidrociclone DC	1.5

## 2.3 – Simulação

A unidade de separação opera sob um sistema de controle descentralizado baseado em controladores do tipo PI (proporcional-integral). Neste esquema de controle, as variáveis controladas são a pressão no interior do vaso ( $P$ ), o nível da fase oleosa ( $h_i$ ) e o nível da interface óleo-água ( $h_w$ ). O controle da pressão no vaso (controlador 1) é realizada pela manipulação da fração de abertura da válvula de saída do gás ( $S_g$ ); o controle do nível de óleo (controlador 2) se dá pela manipulação da fração de abertura da válvula de óleo ( $S_l$ ); o controle do nível de água (controlador 3) é realizada pela manipulação da abertura da válvula de água ( $S_{u3}$ ), e o controle da pressão diferencial (DPR) do hidrociclone DC (controlador 4) é realizada pela manipulação da fração de abertura da válvula de topo ( $S_{o3}$ ). Note-se que o esquema de controle apresentado na figura 2.7, as aberturas das válvulas de topo dos hidrociclones BOW e PDC são manipuladas pelo mesmo controlador 3.

Controladores por realimentação não são adequados para tratar sistemas com pouco tempo de residência como os hidrociclones, quando estes estão sujeitos a oscilações de carga. Por esta razão, a unidade de separação inclui também um controle de razão que é um tipo especial de controle *feedforward*, onde duas perturbações são medidas e é mantida uma relação constante entre elas. Para o hidrociclone, usa-se um controlador PI (controlador 4) para manter constante a relação entre as quedas de pressão da corrente de topo e de fundo, garantindo assim, uma melhor eficiência de separação, pela manutenção, da razão entre as vazões, constante.

Todos os controladores PI utilizados são discretos cuja estrutura é definida pela seguinte relação:

$$u(k) = u(k - 1) + k_c \left[ e(k) - e(k - 1) + \left( \frac{T_s}{\tau_i} \right) \cdot e(k - 1) \right], \quad (2.22)$$

Onde:  $\tau_i$  – constante de tempo integral

$k_c$  – ganho proporcional do controlador

$T_s$  – tempo de amostragem

$u(k)$  – sinal de controle

$e(k)$  – sinal de erro atuante (igual a  $y(k) - y_{sp}$ , sendo  $y$  a saída controlada e  $y_{sp}$  o *setpoint*)

Os parâmetros de sintonia dos controladores 1, 2, 3 e 4 são mostrados na Tabela 2.2, considerando um tempo de amostragem igual a 2s. É importante observar que os controladores 4 e 5 apresentam a mesma sintonia do controlador 3.

Tabela 2.2: Parâmetros dos controladores

controlador	$K_c$	$\tau_i$
Gás (controlador 1)	-0.096	14.6667
Óleo (controlador 2)	-0.5156	366.228
Água (controlador 3)	-2.7749	366.228
DPR (controlador 4)	0.1	8

As figuras 2.8 e 2.9 apresentam as respostas do sistema a mudanças no *setpoint* das saídas controladas da unidade de separação, supondo escoamento de alimentação constante. No tempo  $t=3000s$ , o *setpoint* do nível de óleo varia de 0,5 para 0,4 m. No tempo  $t=5000s$ , o *setpoint* da interface óleo-água varia de 0,5 para 0,6 m. No tempo  $t=7000s$ , a pressão no vaso separador muda de 9,48 para 10,48  $Kgf/cm^2$  e, finalmente, no tempo  $t=9000s$ , há uma variação no *setpoint* da razão de diferencial de pressão do hidrociclone DC de 1,25 para 1,5. Conforme pode ser visto na figura 2.8, as variáveis controladas seguem o *setpoint* especificado, visualizando-se que mudanças no nível da interface influencia na resposta do nível de óleo e na razão do diferencial de pressão do hidrociclone DC. As respostas das entradas manipuladas na figura 2.9 mostra que o perfil das variáveis de nível de óleo e de interface apresentam características integradoras, pelo fato das válvulas relacionadas precisarem retornar ao seu valor estacionário assim que o nível tenha atingido o novo *setpoint*. Por outro lado, o perfil das variáveis de pressão e razão de diferencial de pressão apresentam características estáveis, pois as válvulas relacionadas não precisam retornar a seus estados estacionários prévios.

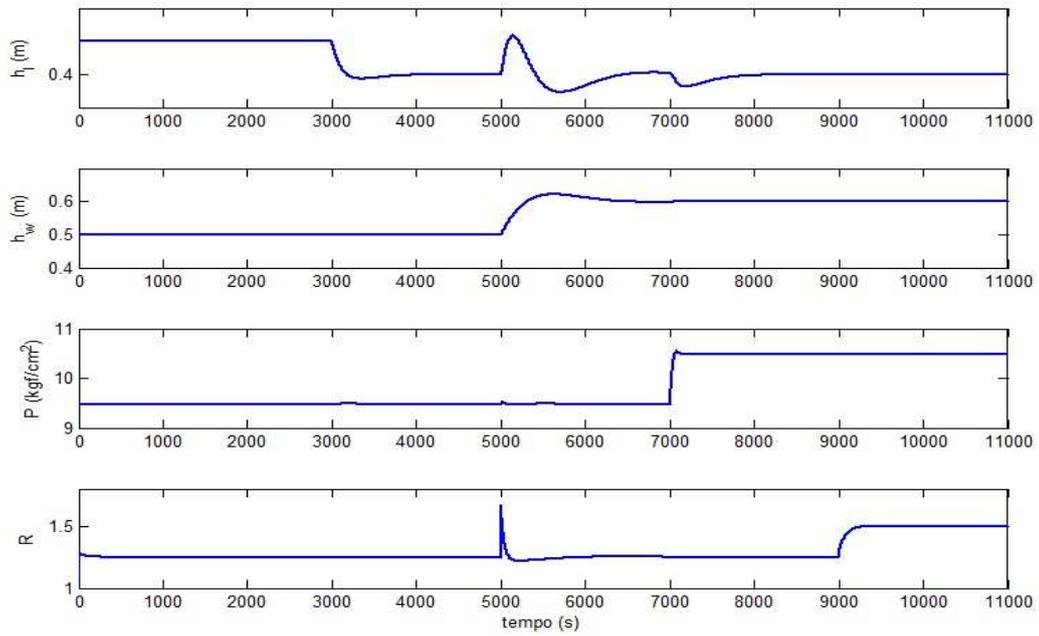


Figura 2.8: Respostas das variáveis controladas da unidade de separação a variações nos setpoints

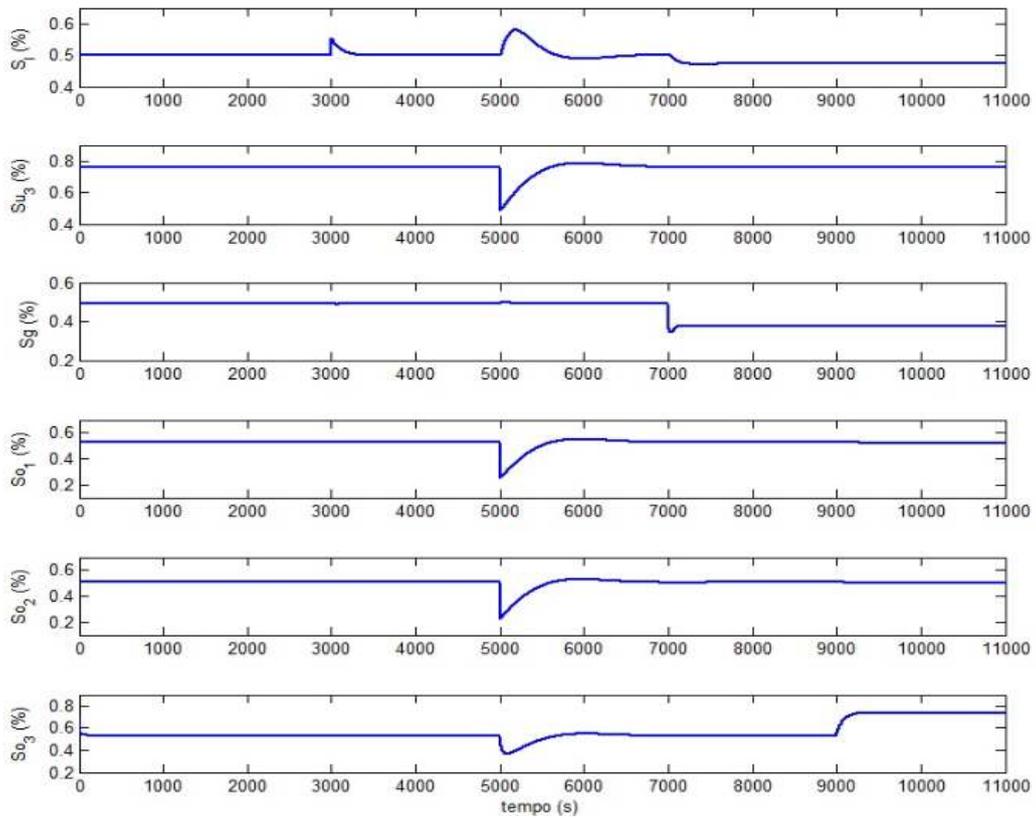


Figura 2.9: Respostas das variáveis manipuladas da unidade de separação a variações nos setpoints

As figuras 2.10 e 2.11 apresentam as respostas do sistema a variações no fluxo de alimentação da unidade de separação, supondo *setpoint* constante

para todos os controladores. No tempo  $t=3000s$ , a parcela de água no fluxo de alimentação aumenta 10%. No tempo  $t=5000s$ , a parcela de óleo no fluxo de alimentação aumenta 10% e, finalmente, no tempo  $t=7000s$ , a parcela de gás no fluxo de alimentação diminui 20%. Na figura 2.10 pode ser visto que quando as vazões de entrada de água e óleo aumentam, o sistema de controle aumenta a abertura das válvulas de água e óleo (na figura 2.11) para tratar de manter as variáveis de níveis controladas no seus *setpoints* especificados, podendo ser observado que, como na figura 2.8, o aumento na parcela de água no fluxo de entrada influencia diretamente o nível de óleo e a razão do diferencial de pressão do hidrociclone DC. É possível observar também que a diminuição do fluxo de gás na alimentação produz uma queda da pressão no vaso separador, mas rapidamente é corrigido pelo sistema de controle reduzindo a abertura da válvula de gás ( $S_g$ ), na figura 2.11.

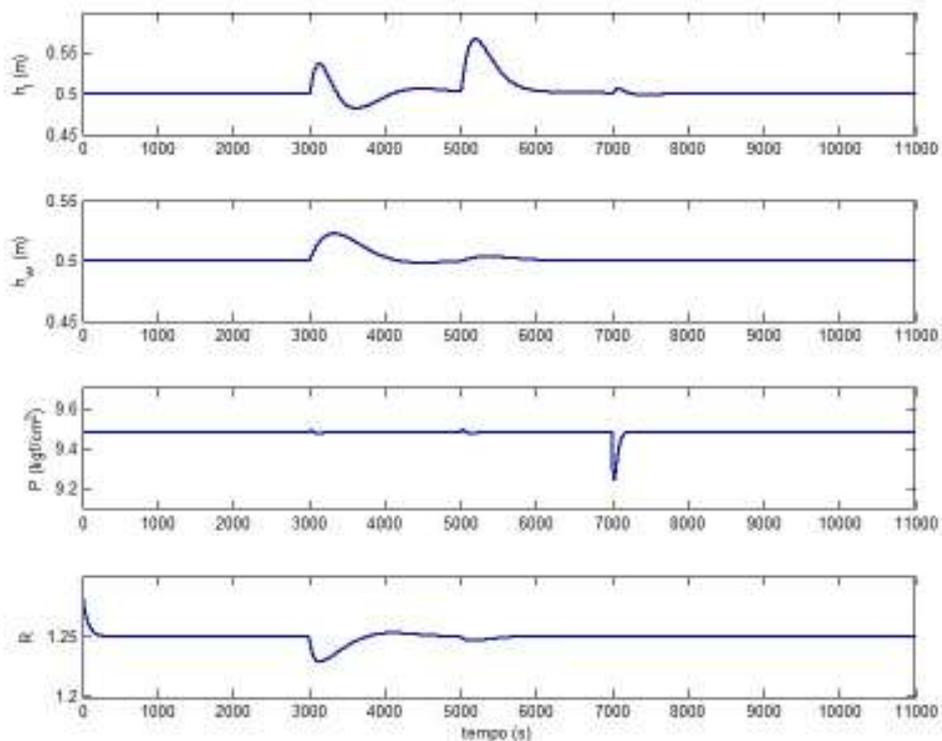


Figura 2.10: Respostas das variáveis controladas da unidade de separação a variações no fluxo de alimentação

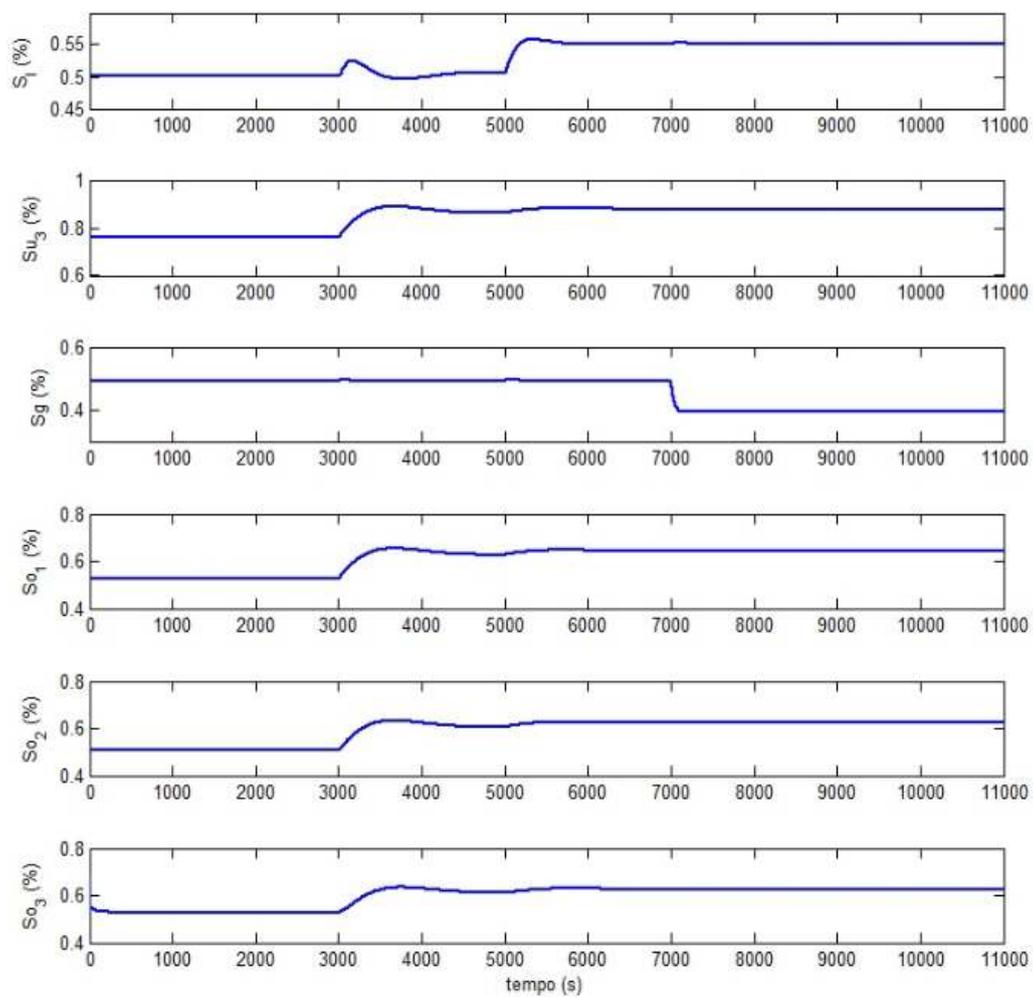


Figura 2.11: Respostas das variáveis manipuladas da unidade de separação a variações no fluxo de alimentação

# Capítulo 3

## Diagnóstico de Falhas

### 3.1 - Introdução

O termo falha é geralmente definido como a saída da faixa aceitável de uma variável observada ou de parâmetros calculados associados ao processo (Himmelblau, 1978). Isto define a falha como um sintoma ou anormalidade do processo tal como alta temperatura de um reator, a baixa qualidade de produção e assim por diante. (Venkatasubramanian et al., 2002).

O diagnóstico de falhas consiste em determinar a falha com tantos detalhes quanto possíveis como localização da falha, dimensão da falha e o tempo de detecção. O procedimento de diagnóstico é baseado nos sintomas analíticos e heurísticos observados e no conhecimento prévio do processo (Isermann, 2005).

As entradas para o diagnóstico baseado no conhecimento são todos disponíveis em sintomas como fatos e o conhecimento das falhas relevantes ao processo.

- Sintomas analíticos: são os limites dos sinais medidos do processo.
- Sintomas heurísticos: são as observações do operador na forma de ruído acústico, oscilações ou impressões óticas como cores ou fumaça, obtido por inspeção.
- Histórico do processo: são fatos que dependem do histórico do processo. Este histórico inclui informações como tempo de funcionamento, medições, última manutenção ou reparo. Se as falhas estatísticas existirem, eles descrevem as frequências de certas falhas para um

mesmo ou similar processo. Dependendo da qualidade dessas medidas, eles podem ser usados como sintoma analítico ou heurístico. No entanto, a informação do histórico do processo geralmente é vaga, e estes fatos são muitas vezes sintomas heurísticos.

- Relação falha-sintoma: a propagação de falhas para o sintoma observado segue a relação de causa e efeito. A figura 3.1 mostra que a falha influencia eventos nos passos intermediários, do qual essas influências são sintomas medido ou observado, ambos por propriedades físicas internas. A diagnose de falhas se processa de maneira inversa. Ele conclui, a partir dos sintomas observados, a falha.

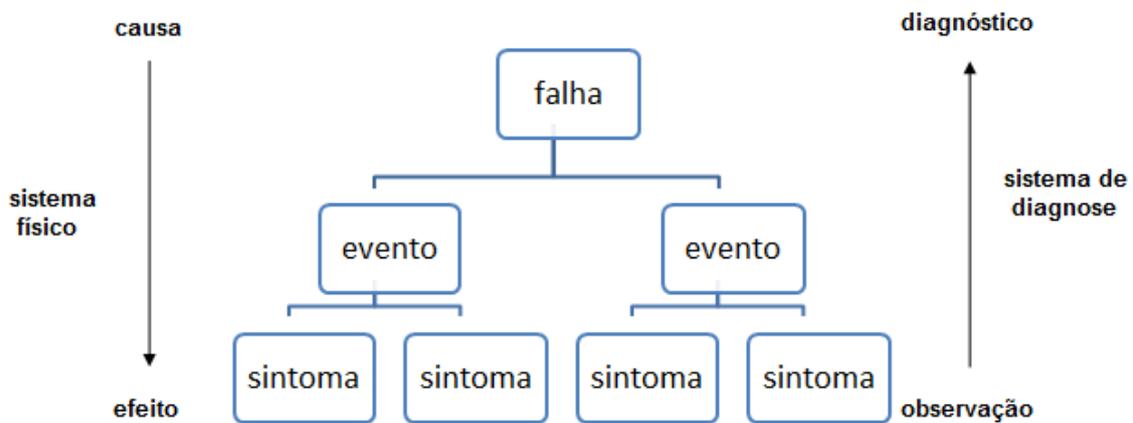


Figura 3.1: Relação falha-sintoma

Na figura 3.2 é mostrado um diagnosticador genérico de um processo controlado onde são indicados diferentes fontes de falhas.



Figura 3.2: Esquema de um diagnosticador genérico (adaptado de Venkatasubramanian et al, 2002)

Detecção e diagnóstico de falhas são fundamentais na supervisão avançada de processos e no gerenciamento de falhas, sendo responsáveis pelo monitoramento do comportamento do sistema ou de uma planta industrial, provendo informações sobre condições anormais de operação de seus componentes (Castro, 2009).

A detecção precoce e a correção de falhas podem ajudar a evitar as paradas dos sistemas e até catástrofes envolvendo fatalidades humanas e danos materiais. HIMMELBLAU (1978) afirmou que o tamanho e a complexidade dos processos químicos e petroquímicos tornavam mandatórios a detecção e o diagnóstico corretos e precoces de falhas, do ponto de vista da segurança da planta, assim como da redução dos custos de produção.

Venkatasubramanian et al. (2002), divide as falhas em três classes diferentes:

1. **Mudança abrupta dos parâmetros do modelo:** Em qualquer modelagem, os processos ocorrem sob certo nível de detalhamento do modelo. As partes que não são modeladas, geralmente são implícitas nos parâmetros e isto inclui interações que cruzam os limites do sistema. Falhas nos parâmetros surgem quando existe distúrbio entrando no sistema vindo do ambiente por meio de um ou mais variáveis independentes.
2. **Mudanças estruturais:** Esse tipo de falha acontece devido a mudanças abruptas no equipamento. Esse mal funcionamento estrutural resulta na mudança de fluxo de informações entre as várias variáveis. Para tal manipulação da falha, o sistema de diagnose precisaria remover equações do modelo para reestruturar outras equações no sentido de descrever a situação atual do processo.
3. **Mal funcionamento de sensores e atuadores:** Erros abruptos geralmente ocorrem com sensores e atuadores. Alguns desses instrumentos fornecem um sinal de realimentação que é essencial para o controle da planta. A falha em um desses instrumentos poderia causar às variáveis da planta desvios além dos limites aceitáveis, a menos que as falhas sejam detectadas e as ações de correção sejam feitas a tempo (Venkatasubramanian et al., 2010 e Lima et al., 2010).

Venkatasubramanian et al., (2003) também propõem uma lista de dez características desejáveis para um sistema diagnosticador de falhas. São eles:

- **Rápida detecção e diagnóstico:** O sistema de diagnóstico deve responder rapidamente na detecção e diagnóstico do mal funcionamento do processo. No entanto, a rápida resposta para a diagnose de falhas e performance tolerante durante a operação normal são dois objetivos conflitantes (Willsky, 1976). O sistema que é projetado para diagnosticar falhas (particularmente mudanças abruptas), será sensível a mudanças de altas frequências. Isso torna o sistema sensível a ruídos e o conduz o sistema a alarmes falsos durante a operação normal, o que é indesejável.
- **Isolabilidade:** É a habilidade do sistema de diagnóstico fazer a distinção de diferentes falhas. Claro que essa habilidade depende em grande parte das características do processo. Existe também um equilíbrio entre isolabilidade e rejeição de incertezas de modelagem. A maioria dos isoladores trabalham com várias formas de informações redundantes e por isso existe somente um grau de liberdade para projetar o isolador. Devido a isto, um isolador com alto grau de isolabilidade teria um pobre trabalho de rejeição de incertezas de modelagem e vice-versa.
- **Robustez:** É interessante que um sistema de diagnóstico seja robusto para ruídos e incertezas e que o desempenho da planta degrade suavemente ao invés de uma falha total e abrupta. Robustez evita testes de isolabilidade determinística onde os limites estão próximos de zero. Na presença de ruído estes limites podem ser escolhidos de maneira conservadora.
- **Nova identificabilidade:** Um dos requisitos mínimos de um sistema de diagnose é a habilidade de decisão, dado as condições atuais do processo, se o processo está funcionando normal ou anormal, e se anormal, se as causas do mau funcionamento são conhecidas ou não. Este critério é conhecido como nova identificabilidade.
- **Classificação da estimação de erros:** Uma prática importante requerida para o sistema diagnosticador é a construção da confiança do usuário no equipamento. Isto poderia ser facilitado se o diagnosticador pudesse fornecer a priori uma estimação do erro que possa ocorrer. Tais medições

de erros seriam úteis para projetar níveis de confiança nas decisões do sistema, dando ao usuário melhor sentimento de confiança sobre o sistema.

- **Adaptabilidade:** Processos em geral mudam devido às perturbações externas ou mudanças estruturais. As condições de operação do processo podem mudar não somente devido aos distúrbios, mas também devido às mudanças nas condições ambientais. Assim, o diagnosticador deve ser adaptável a essas mudanças.
- **Facilidade de explicação:** Ao lado da habilidade de identificar a fonte da falha, um diagnosticador deve também fornecer a explicação de como a falta se originou e se propagou até a situação atual. Isto é um fator muito importante para projetar um sistema de suporte de decisão on-line.
- **Requisitos de modelagem:** A modelagem requerida para desenvolver um diagnosticador é uma parte importante. Para o desenvolvimento rápido e fácil de um sistema em tempo real, o esforço de modelagem deve ser o mínimo possível.
- **Armazenamentos e requisitos computacionais:** Normalmente, solução em tempo real requerem algoritmos e implementações computacionalmente complexas implicará em um alto grau de armazenamento. É preferível um sistema de diagnóstico que esteja equilibrado entre estes dois pontos.
- **Identificabilidade de múltiplas falhas:** A habilidade de identificar múltiplas falhas é um requisito importante, porém difícil. Em um sistema não-linear normalmente seriam sinérgico e portanto o sistema pode não ser capaz de usar os padrões de falhas individuais para modelar um efeito combinado das falhas.

## 3.2 - Classificação dos algoritmos de diagnóstico

O conhecimento prévio do processo é necessário para o diagnosticador e é dado por uma série de características e relações entre os sintomas observados e as falhas. Tal conhecimento pode ser referido como profundo, casual ou baseado no modelo (Milne, 1987), podendo ser adquirido a partir de experiências passadas com o processo.

O conhecimento baseado em modelos pode ser classificado como qualitativos e quantitativos. Nos modelos quantitativos, a planta é expressa em termos de funções matemáticas relacionadas entre as entradas e saídas do sistema. Os modelos qualitativos, por sua vez são relacionados em termos de funções qualitativas centradas em diferentes unidades de processo. Em contraste às aproximações baseadas em modelos, supõem-se a disponibilidade de grande quantidade de dados do processo.

Existem diferentes caminhos pelos quais estes dados podem ser transformados e apresentados como conhecimentos prévios para o sistema diagnosticador. Isto é feito extraíndo-se características do processo a partir dos dados históricos, feito assim para facilitar o diagnóstico. Estas extrações ou abstrações de características podem ser tanto qualitativas como quantitativas. Em características quantitativas, as abstrações podem se comportar como estatísticas ou não estatísticas. Esta classificação pode ser vista na figura 3.3.

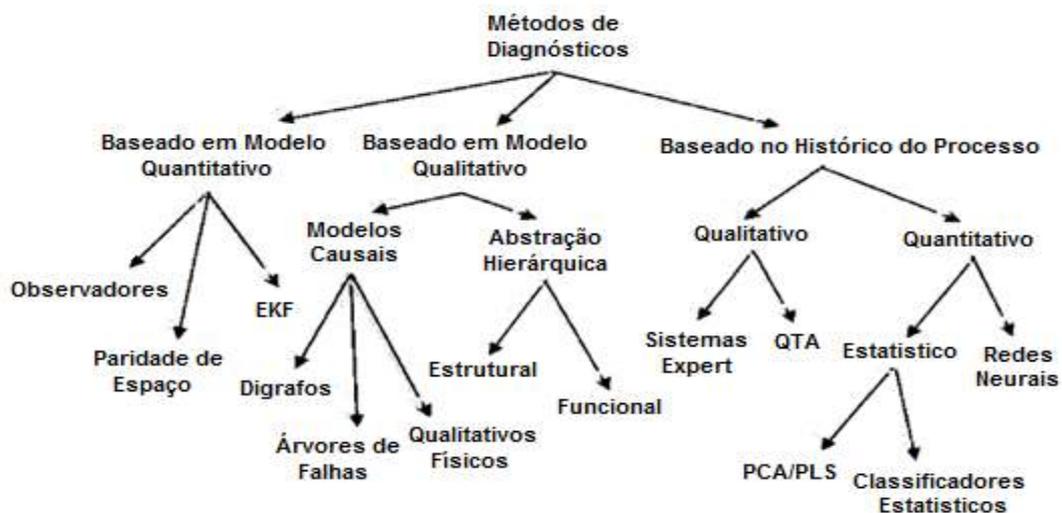


Figura 3.3: Classificação dos algoritmos de diagnósticos (adaptado de Venkatasubramanian et al., 2002)

De acordo com De Souza Jr. (2005), os métodos quantitativos baseados em modelo requerem dois passos: (i). verificação de inconsistências ou resíduos “r” (diferença entre várias funções das saídas e os valores esperados destas funções sob condições sem falhas) entre o comportamento real e o esperado e (ii). escolha de uma regra de decisão para diagnóstico. Neste tipo de estratégia, são empregados estimadores de estado e de parâmetros. Os resíduos gerados são examinados e funções de decisão são calculadas baseadas nos resíduos e regras de decisão (lógica).

Os métodos qualitativos baseados em modelos envolvem análise causa-efeito sobre o comportamento do sistema. Por exemplo: árvores de falhas usam encadeamento até que se encontre um evento primário como possível causa para o desvio observado do processo. Apresentam-se como desvantagens o emprego de um grande número de hipóteses e um alto esforço computacional e como vantagem o fato de imitar a análise humana: geração direta de explicação.

Por sua vez, os métodos baseados no histórico do processo fazem uso de uma grande quantidade de dados. Eles são também divididos em métodos qualitativos e métodos quantitativos. Os métodos qualitativos são baseados em sistemas especialistas e envolvem um mapeamento explícito dos sintomas conhecidos para as raízes causais. Já os métodos quantitativos baseados no histórico do processo empregam redes neurais e métodos estatísticos (como Statistical Process Control) (Castro, 2009).

Todos os sistemas de diagnóstico apresentam vantagens e desvantagens; logo nenhum sistema isolado é ideal para todas as aplicações. Normalmente, um bom sistema de diagnóstico é formado por múltiplos métodos sendo chamados de sistemas híbridos. Os sistemas se complementam, resultando em um sistema de diagnóstico mais eficiente (Chiang et al, 2001).

Tradicionalmente, os métodos mais utilizados de FDD (fault detection and diagnosis) são os baseados no modelo do processo. Como apresentado anteriormente, tais métodos tentam detectar qualquer discrepância que ocorra entre a saída do sistema e a saída prevista pelo modelo, supondo que esta discrepância esteja relacionada a uma falha. Nesse contexto, na presente

dissertação será utilizado um método qualitativo baseado no modelo (árvore de falhas), utilizando modelos a Eventos Discretos (Sampath et al., 1995) e (Basílio et al., 2010). Baseado nesse método será projetado um sistema diagnosticador para o processo de separação trifásico descrito no capítulo 2. Serão realizadas simulações em Simulink para analisar o desempenho e a funcionalidade do sistema diagnosticador.

# Capítulo 4

## Sistemas a Eventos Discretos

### 4.1 – Introdução

Sistemas a eventos discretos (SED) são sistemas dinâmicos de estados discretos cuja transição de estados se dá por meio da ocorrência, em geral assíncrona, de eventos. O fato do estado do sistema ser discreto implica que este pode assumir valores simbólicos, como por exemplo {ligado, desligado}, {verde, amarelo, vermelho}, ou valores discretos tais como valores numéricos pertencentes aos conjuntos  $\mathbb{N}$  ou  $\mathbb{Z}$ , ou ser formado por um subconjunto enumerável de elementos de  $\mathbb{R}$ . Eventos podem estar associados a ações específicas (por exemplo, alguém aperta um botão, um avião levanta voo etc.), ou ser o resultado de diversas condições que são satisfeitas (uma peça atinge um determinado ponto de uma linha de produção, o líquido dentro de um tanque atinge uma determinada altura). Embora seja possível modelar qualquer sistema físico como um SED de acordo com o grau de abstração considerado, determinados sistemas são naturalmente discretos e com evolução determinada pela ocorrência de eventos.

Assim como na modelagem de sistemas dinâmicos de variáveis contínuas (SDVC), um modelo para um SED deve ser capaz de reproduzir, dentro de limites de tolerância pré-estabelecidos, o comportamento do sistema. Enquanto nos SDVCs as trajetórias dos estados são descritas em função do tempo, nos SEDs elas são função de uma sequência de eventos. Todas as sequências de

eventos possíveis de serem geradas por um SED caracterizam a linguagem desse sistema, sendo esta definida sobre o conjunto de eventos (alfabeto) do sistema. Assim, ao se considerar a evolução dos estados de um SED, a maior preocupação é com a sequência de estados visitados e com os eventos que causaram as correspondentes transições de estado, isto é, o modelo de um SED é composto basicamente de dois elementos, estados e eventos. A teoria apresentada a seguir são conceitos básicos para o entendimento de SED, a qual é baseada em Cassandras e Lafortune (2008).

## 4.2 – Linguagem

### 4.2.1 – Linguagem para sistemas a eventos discretos

Um dos caminhos formais para estudar o comportamento de um SED é baseado na teoria de linguagens e autômatos. O ponto inicial é o fato de existir um conjunto de eventos  $\Sigma$  associados a ele. O conjunto de eventos  $\Sigma$  é como se fosse o “alfabeto” da linguagem e a sequência de eventos é como se fossem as “palavras” da linguagem.

Vamos supor que  $\Sigma$  seja finito. O tamanho da palavra é o número de eventos contido nela. Se  $s$  for uma palavra, denotaremos  $|s|$  como o seu tamanho. Uma palavra que não contém eventos é denominada vazia e é denotada por  $\varepsilon$ .

**Definição 4.1 (linguagem):** A linguagem definida sobre o conjunto de eventos  $\Sigma$  é o conjunto de sequências (palavras) de tamanho finito formado por eventos de  $\Sigma$ .

Como exemplo temos  $\Sigma = \{a, b, g\}$  um conjunto de eventos. Podemos então definir a linguagem

$$L_1 = \{\varepsilon, a, abb\} \quad (4.1)$$

que consiste em somente três palavras; ou a linguagem

$$L_2 = \{\text{todas as possíveis palavras de tamanho 3 iniciando com o evento } a\} \quad (4.2)$$

que contém nove palavras.

Vamos denotar que  $\Sigma^*$  é o conjunto de todas as sequências finitas do conjunto  $\Sigma$ , incluindo a sequência vazia  $\varepsilon$ . Qualquer linguagem  $L$  sobre  $\Sigma$  é um subconjunto de  $\Sigma^*$ , isto é  $L \subseteq \Sigma^*$  é uma linguagem.

A operação chave para a construção de palavras, e conseqüentemente de linguagens do conjunto de eventos  $\Sigma$  é a *concatenação*. A palavra  $abb$  em  $L_1$ , acima, é a concatenação da palavra  $ab$  com o evento (ou a palavra de tamanho 1)  $b$  e  $ab$  é a concatenação de  $a$  e  $b$ . A palavra vazia  $\varepsilon$  é o elemento identidade da concatenação, isto é,  $\varepsilon u = u\varepsilon = u$  para qualquer palavra  $u$ .

#### 4.2.2 – Operações com linguagens

O conjunto de operações usuais, tais como união, intersecção, diferença e complemento com respeito a  $\Sigma^*$  (o conjunto de todas as palavras finitas dos elementos de  $\Sigma$ , incluindo a palavra vazia  $\varepsilon$ ), são aplicáveis a linguagens uma vez que linguagens são conjuntos. Além dessas operações, quatro outras operações podem ser definidas para linguagens: concatenação, fecho do prefixo, fecho de Kleene e a projeção.

- *Concatenação*: Seja  $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$ , então

$$L_a L_b = \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \text{ e } (s_a \in L_a) \text{ e } (s_b \in L_b)\} \quad (4.3)$$

Em outras palavras, uma sequência está em  $L_a L_b$  se ela puder ser escrita como uma concatenação de uma sequência em  $L_a$  com outra sequência em  $L_b$ .

- *Fecho do prefixo*: Sendo  $L \subseteq \Sigma^*$ , então

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*) \{st \in L\}\} \quad (4.4)$$

Em outras palavras, o fecho do prefixo de  $L$  é a linguagem denotada por  $\bar{L}$  que consiste em todos os prefixos de todas as sequências em  $L$ . Em geral,  $L \subseteq \bar{L}$ .

- *Fecho de Kleene*: Para uma linguagem  $L \subseteq \Sigma^*$ , tem-se que

$$L^* = \{\varepsilon\}L \cup LL \cup LLL \cup \dots \quad (4.5)$$

Esta é a mesma operação que foi definida anteriormente para o conjunto  $\Sigma$  exceto que agora é aplicada para o conjunto  $L$  do qual os elementos podem ser palavras de tamanho maior que um

- **Projeção:** A projeção  $P_0$  é definida como

$$P_0 : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_0^*, \text{ sendo } \Sigma_0 \subset \Sigma \quad (4.6)$$

$$s \rightarrow P_0(s),$$

com as seguintes propriedades:

$$P_0(\varepsilon) = \varepsilon,$$

$$P_0(\sigma) = \begin{cases} \sigma, & \text{se } \sigma \in \Sigma_0, \\ \varepsilon, & \text{se } \sigma \in \Sigma/\Sigma_0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$P_0(s\sigma) = P_0(s)P_0(\sigma), s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma.$$

O operador projeção pode ser estendido para linguagens de forma natural aplicando a projeção (3.7) a todas as sequências dessa linguagem. Assim, se  $L \subseteq \Sigma^*$  então

$$P_0(L) = \{t \in \Sigma_0^* : (\exists s \in L)[P_0(s) = t]\} \quad (4.8)$$

De acordo com a definição acima, a projeção consiste em apagar das sequências de  $L$  os eventos que não pertencem a  $\Sigma_0$ . Do ponto de vista prático, essa operação representa a linguagem observada de um sistema, isto é, as sequências formadas pelos eventos cujas ocorrências são, de alguma forma, do conhecimento do observador.

A projeção inversa  $P_0^{-1}$  é definida da seguinte forma:

$$P_0^{-1} : \Sigma_0^* \rightarrow 2^{\Sigma^*}$$

$$s \rightarrow P_0^{-1}(s) = \{t \in \Sigma^* : P_0(t) = s\} \quad (4.9)$$

A projeção inversa da linguagem  $M$  restrita à linguagem  $L$  é definida como:

$$P_{0L}^{-1}(M) = \{s \in L : (\exists y \in M)[P(s) = y]\} \quad (4.10)$$

### 4.3 - Autômatos

Um autômato é um dispositivo capaz de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas. O caminho mais simples para apresentar a noção de autômato é considerar sua representação por gráficos, ou diagrama de transição de estados.

#### Definição 4.2 (autômato determinístico)

Um autômato determinístico, denotado por  $G$ , é uma sêxtupla

$$G = (X, E, f, \Gamma, x_0, X_m), \quad (4.11)$$

em que  $X$  é o conjunto de estados,  $E$  é o conjunto de eventos associados com  $G$ ,  $f: X \times E \rightarrow X$  é a função de transição ( $f(x, e) = y$  significa que existe uma transição rotulada pelo evento  $e$  do estado  $x$  para o estado  $y$ ),  $\Gamma: X \rightarrow 2^E$  é a função de eventos ativos (ou função de eventos viáveis) ( $\Gamma(x)$  é o conjunto de todos os eventos  $e$  para o qual  $f(x, e)$  é definido e é chamado de conjunto de eventos ativos de  $G$  em  $x$ ),  $x_0$  é o estado inicial e  $X_m \subseteq X$  é o conjunto de estados marcados.

Autômatos são representados graficamente através de diagramas de transição de estados. Nesses diagramas os estados são representados por circunferências e são conectados entre si por arcos identificados (rotulados) com símbolos, que representam os eventos que determinam as transições entre os estados ligados pelo arco. Os estados marcados são identificados por duas circunferências concêntricas e estão, em geral, relacionados ao cumprimento de uma tarefa a ser realizada pelo sistema modelado pelo autômato. O estado inicial é indicado por uma seta apontada a ele, não oriunda de qualquer outro estado. A figura 4.1 mostra o diagrama de transição de estados de um autômato.

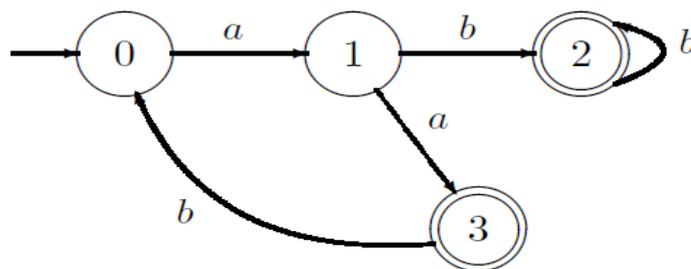


Figura 4.1: Autômato simples (Basilio et al., 2010)

Um autômato é um dispositivo capaz de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas. São dois os tipos de linguagens que podem ser associadas ao comportamento de um autômato: a linguagem gerada e a linguagem marcada. A linguagem gerada (denotada por  $L$ ) representa todos os caminhos que podem ser seguidos no diagrama de transição de estados, começando pelo estado inicial. A linguagem marcada (denotada por  $L_m$ ) é um subconjunto da linguagem gerada e consiste em todos os caminhos que terminam em um estado marcado no diagrama de transição de estados.

**Definição 4.3 (Linguagem gerada e marcada)**

A linguagem gerada de  $G = (X, E, f, \Gamma, x_0, X_m)$  é

$$L(G) = \{s \in E^* : f(x_0, s) \text{ é definida}\}. \tag{4.12}$$

A linguagem marcada de  $G$  é

$$L_m(G) = \{s \in L(G) : f(x_0, s) \in X_m\}. \tag{4.13}$$

A linguagem  $L(G)$  representa todos os caminhos direcionados compatíveis com o diagrama de transição de estados, começando do estado inicial, sendo a sequência correspondente a um caminho formada pela concatenação dos rótulos dos eventos das transições que compõe o caminho.

A linguagem marcada  $L_m(G)$  é o subconjunto de  $L(G)$  formado apenas pelas trajetórias  $s$  nas quais  $f(x_0, s) \in X_m$ , isto é, as sequências correspondentes as trajetórias que terminam em um estado marcado do diagrama de transição de estados.

**Exemplo 4.1:** Considere o autômato  $G = (X, E, f, \Gamma, x_0, X_m)$  da figura 4.2.

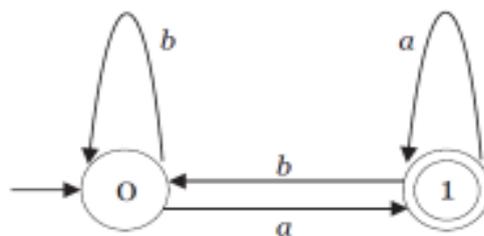


Figura 4.2: Exemplo de autômato (Rivera, 2007)

Para esse autômato,  $X = \{0,1\}$  (o conjunto de estados),  $E = \{a,b\}$  (o conjunto de eventos),  $x_0 = 0$  (o estado inicial),  $X_m = \{1\}$  (o estado marcado), e  $f$  é definida como  $f(0,a) = 1, f(0,b) = 0, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$ . O conjunto de eventos ativos é dado por:  $\Gamma(0) = \{a,b\}$  e  $\Gamma(1) = \{a,b\}$ .

A linguagem gerada pelo autômato  $G$  é o próprio  $E^*$ , isto é,  $L(G) = \{a,b,aa,ba,bb,aaa,\dots\}$ . Posto que  $X_m = \{1\}$ , então a linguagem marcada é  $L_m(G) = \{\varepsilon, a, aa, ba, aaa, aba, baa, bba, \dots\} = \{b\}^*\{a\}[\{a\} \cup \{b\}\{b\}^*\{a\}]^*$ .

Pode-se, então, concluir que um autômato  $G$  é a representação de duas linguagens: a linguagem gerada  $L(G)$  e linguagem marcada  $L_m(G)$ .

Suponha que  $G_1 = (X_1, E_1, f_1, \Gamma_1, x_{0_1}, X_{m_1})$  e  $G_2 = (X_2, E_2, f_2, \Gamma_2, x_{0_2}, X_{m_2})$  sejam dois autômatos distintos e que se deseje obter um autômato que modele o comportamento síncrono de  $G_1$  e  $G_2$ , isto é: (i) um evento comum a  $G_1$  e  $G_2$  somente poderá ocorrer quando ambos,  $G_1$  e  $G_2$ , estiverem em estados cujos conjuntos dos eventos ativos tenham esse evento como elemento; (ii) eventos privados, isto é, pertencentes a  $\Sigma_1 \setminus \Sigma_2$  ou a  $\Sigma_2 \setminus \Sigma_1$  podem ser executados sempre que possível. Tal autômato existe e pode ser obtido utilizando a chamada composição paralela de  $G_1$  e  $G_2$ , denotada por  $G_1 || G_2$  e definida da seguinte forma:

$$G_1 || G_2 = Ac(X_1 \times X_2, E_1 \cup E_2, f_{1||2}, \Gamma_{1||2}, (x_{0_1}, x_{0_2}), X_{m_1} \times X_{m_2}), \quad (4.14)$$

sendo que  $\times$  denota o produto cartesiano e  $Ac$  denota a parte acessível de  $G_1 || G_2$ , a qual é formada pelos estados que podem ser alcançados a partir do estado inicial por uma sequência em  $(\Sigma_1 \cup \Sigma_2)^*$ . A função de transição de estados de  $G_1 || G_2$  é definida como:

$$f_{1||2}((x_1, x_2), \sigma) = \begin{cases} (f_1(x_1, \sigma), f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2), \\ (f_1(x_1, \sigma), x_2), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2, \\ (x_1, f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1 \\ \text{caso contrário, não definido} \end{cases} \quad (4.15)$$

Outra composição importante entre autômatos é a composição produto. Essa composição permite somente transições com eventos comuns e é definida da seguinte forma:

$$G_1 \times G_2 = Ac(X_1 \times X_2, E_1 \cap E_2, f_{1 \times 2}, \Gamma_{1 \times 2}, (x_{0_1}, x_{0_2}), X_{m_1} \times X_{m_2}), \quad (4.16)$$

sendo

$$f_{1 \times 2}((x_1, x_2), \sigma) = \begin{cases} (f_1(x_1, \sigma), f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2) \\ \text{n\~{a}o definido, caso contr\~{a}rio} & \end{cases} \quad (4.17)$$

Se  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ , ent\~{a}o a composi\~{c}o\~{a}o paralela reduzir-se-\~{a} ao produto, j\~{a} que todos os eventos s\~{a}o comuns.

Suponha que  $\Sigma$  seja particionado como  $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$ , isto \~{e},  $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$ ,  $\Sigma_o \cap \Sigma_{uo} = \emptyset$  e  $\Sigma_{uo} \neq \emptyset$ , sendo  $\Sigma_o$  o conjunto dos eventos observ\~{a}veis e  $\Sigma_{uo}$  o conjunto de eventos n\~{a}o observ\~{a}veis. Um evento \~{e} observ\~{a}vel quando sua ocorr\~{e}ncia puder ser registrada atrav\~{e}s de sensores ou quando estiver associado a comandos. Os eventos n\~{a}o-observ\~{a}veis, por sua vez, designam aqueles eventos do sistema cuja ocorr\~{e}ncia n\~{a}o pode ser observada por sensores (incluindo os eventos de falhas) ou, embora haja sensores para registr\~{a}-los, esses eventos n\~{a}o podem ser vistos em fun\~{c}o\~{a}o da natureza distribu\~{i}da do sistema. Quando  $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$  tem-se o chamado aut\~{o}mato determin\~{i}stico com eventos n\~{a}o-observ\~{a}veis.

O comportamento din\~{a}mico de um aut\~{o}mato determin\~{i}stico com eventos n\~{a}o-observ\~{a}veis pode ser descrito por um aut\~{o}mato determin\~{i}stico, denominado observador, cujo conjunto de eventos \~{e} formado pelos eventos observ\~{a}veis. Os estados do observador s\~{a}o todos os estados em que um aut\~{o}mato determin\~{i}stico com eventos n\~{a}o-observ\~{a}veis pode estar ap\~{o}s a observa\~{c}o\~{a}o de uma sequ\~{e}ncia de eventos observ\~{a}veis. O observador para  $G$ , denotado por  $Obs(G)$ , \~{e} definido da seguinte forma:

$$Obs(G) = (X_{obs}, E_o, f_{obs}, \Gamma_{obs}, x_{0_{obs}}, X_{m_{obs}}) \quad (4.18)$$

sendo  $X_{obs} \in 2^X$  e  $X_{m_{obs}} = \{B \in X_{obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$ . Para a defini\~{c}o\~{a}o de  $x_{0_{obs}}, \Gamma_{obs}, f_{obs}$ , \~{e} necess\~{a}rio introduzir o conceito de alcance n\~{a}o-observ\~{a}vel de um estado  $x \in X$  (denotado por  $UR(x)$ ):

$$UR(x) = \{y \in X : (\exists t \in \Sigma_{uo}^*) [f(x, t) = y]\} \quad (4.19)$$

De forma análoga, o alcance não-observável de um conjunto  $B \in 2^X$  é definido como

$$UR(B) = \bigcup_{x \in B} UR(x). \quad (4.20)$$

Usando as equações 4.19 e 4.20, pode-se definir  $x_{0_{obs}}$ ,  $\Gamma_{obs}$ ,  $f_{obs}$  e  $X_{obs}$  de acordo com o algoritmo a seguir.

**Algoritmo 4.1:** (construções de observadores)

**Passo 1:** Defina  $x_{0_{obs}} = UR(x_0)$  e faça  $X_{obs} = \{x_{0_{obs}}\}$  e  $\tilde{X}_{obs} = X_{obs}$ .

**Passo 2:**  $\hat{X}_{obs} = \tilde{X}_{obs}$  e  $\tilde{X}_{obs} = \emptyset$ .

**Passo 3:** Para cada  $B \in \hat{X}_{obs}$ ,

- $\Gamma_{obs}(B) = (\bigcup_{x \in B} \Gamma(x)) \cap \Sigma_o$
- Para cada  $e \in \Gamma_{obs}(B)$ ,  
 $f_{obs}(B, e) = (\{x \in X : (\exists y \in B)[x = f(y, e)]\});$
- $\tilde{X}_{obs} \leftarrow \tilde{X}_{obs} \cup f_{obs}(B, e)$ .

**Passo 4:**  $X_{obs} \leftarrow X_{obs} \cup \tilde{X}_{obs}$ .

**Passo 5:** Repita os passos 2 e 4 até que toda parte acessível de  $Obs(G)$  tenha sido construída.

**Passo 6:**  $X_{m_{obs}} = \{B \in X_{obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$ .

A ideia do algoritmo 4.1 é calcular o alcance não-observável para cada estado de  $G$  alcançado por um evento observável. Assim, no passo 1 calcula-se o alcance não-observável do estado inicial  $x_0$  formando o estado inicial do observador. No passo 3 calculam-se os conjuntos dos eventos ativos dos estados do observador obtidos no passo anterior ou na iteração anterior (o primeiro se refere ao alcance observável do estado inicial e o último aos estados de  $G$  alcançados por meio de eventos observáveis juntamente com os

respectivos alcances não-observáveis). Além disso, são calculados os próximos estados do observador, que correspondem aos alcances não-observáveis dos estados de  $G$  alcançados a partir do estado atual do observador por meio de eventos observáveis. Essa sequência é repetida até que todos os estados acessíveis do observador tenham sido encontrados (Cassandras e Lafortune, 2008).

## 4.4 – Diagnose de Falhas baseado em SED

Nessa seção apresentaremos apenas conceitos principais para o desenvolvimento de sistemas diagnosticadores de falhas. Uma abordagem mais detalhada pode ser encontrada no tutorial apresentado por Basílio et al. (2010). Como foi visto anteriormente, ao se incorporar eventos não-observáveis no modelo  $G$ , torna-se possível considerar tanto o comportamento normal do sistema, descrito pelos eventos observáveis e pelos eventos não-observáveis que não sejam associados a falhas no sistema, como também o comportamento anormal do sistema. Para esse fim, seja  $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$  o conjunto dos eventos associados às falhas do sistema. Em geral, o conjunto  $\Sigma_f$  é particionado em diferentes subconjuntos  $\Sigma_{f_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , não necessariamente unitários, em que cada conjunto  $\Sigma_{f_i}$  é formado por eventos que modelam falhas que são, de alguma forma correlacionadas.

No estudo de diagnose de falhas de SEDs, as seguintes notações serão utilizadas.

- $s_f$ : último evento da sequência  $s$ .
- $\psi(\Sigma_f) = \{s \in L : s_f \in \Sigma_f\}$ : conjunto de todas as sequências de  $L$  que terminam com o evento  $\sigma_f$ .
- $L/s = \{t \in \Sigma^* : st \in L\}$ : continuação da linguagem de  $L$  após uma sequência  $s$ .

Suponha que  $\bar{s}$  denote o fecho do prefixo de  $s$ . Com um ligeiro abuso de notação a relação de pertinência  $\Sigma_f \in s$  será usada para denotar que  $\bar{s} \cap \psi(\Sigma_f) \neq \emptyset$ .

**Definição 4.4:** Uma sequência  $s \in L$  é uma sequência que contém uma falha se  $\Sigma_f \in s$ .

**Definição 4.5:** Seja  $L$  uma linguagem gerada por um autômato  $G$  e suponha que  $L$  seja viva e prefixo-fechada. Então  $L$  é diagnosticável em relação a projeção  $P_o$  e  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  se a seguinte condição for verificada (Sampath et al., 1995):

$$(\exists n \in \mathbb{N}) \left( \forall s \in \psi(\Sigma_f) \right) (\forall t \in L/s) (\|t\| \geq n \Rightarrow D), \quad (4.21)$$

sendo a condição de diagnose  $D$  expressa por

$$\left( \forall \omega \in P_{oL}^{-1}(P_o(st)) \right) (\Sigma_f \in \omega) \quad (4.22)$$

Informalmente, diz-se que a linguagem gerada por um autômato será diagnosticável em relação a um conjunto de eventos observáveis  $\Sigma_o$  e um conjunto de eventos de falhas  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  se a ocorrência de  $\sigma_f$  puder ser detectada após um número finito de transições depois da ocorrência de  $\sigma_f$  usando somente sequências de eventos observáveis.

## 4.5 – Diagnosticador

Com o objetivo de se realizar a diagnose de falhas a partir da observação do comportamento do sistema em tempo real e para verificar se a linguagem gerada por um autômato  $G$  é diagnosticável, pode-se utilizar um autômato determinístico denominado diagnosticador. Além disso, dependendo de como as informações sobre a evolução dinâmica do sistema for disponibilizada, isto é, centralizada em um único sistema de aquisição ou distribuída como no caso de redes de comunicação, sistemas de manufaturas, e sistemas elétricos de potência, podem-se definir duas estruturas para a diagnose de falhas em SEDs:

1. Diagnosticador centralizado: utiliza um único diagnosticador que tem acesso a todos os eventos observáveis do sistema;

2. Codiagnosticadores (diagnosticadores descentralizados): a leitura dos sensores não é centralizada, mas sim distribuída em diferentes módulos. Cada módulo observa o comportamento de parte do sistema utilizando um subconjunto do conjunto de eventos observáveis do sistema (Debouk et al., 2000).

#### 4.5.1 – Diagnose centralizada

O diagnosticador centralizado denotado por  $G_d$  é um autômato cujo conjunto de eventos é igual ao conjunto dos eventos observáveis de  $G$  e cujos estados são formados adicionando-se os rótulos  $Y$  e  $N$  aos estados de  $G$  para indicar se o evento  $\sigma_f$  ocorreu ou não. Formalmente,  $G_d$  é definido como

$$G_d = (X_d, E_d, f_d, \Gamma_d, x_{0_d}, X_{m_o}). \quad (4.23)$$

sendo  $X_d \subseteq 2^{X \times \{N, Y\}}$ ,  $E_d = E_0, E_1 \dots$ . O diagnosticador  $G_d$  pode ser construído em dois passos: (i) obtenha a composição paralela  $G||A_l$ , sendo  $A_l$  o autômato rotulador de dois estados mostrado na figura abaixo; (ii) calcule  $Obs(G||A_l)$ .

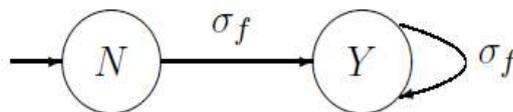


Figura 4.3: Autômato rotulador (Basilio et al., 2010)

É importante observar que o autômato obtido após a composição paralela realizada no passo (i), gera a mesma linguagem que  $G$ . Além disso, os estados de  $G||A_l$  são da forma  $(x, Y)$  ou  $(x, N)$ , dependendo se  $\sigma_f$  está ou não na sequência que leva  $x_0$  até  $x$ ; conseqüentemente  $x_d \in 2^{X \times \{N, Y\}}$ .

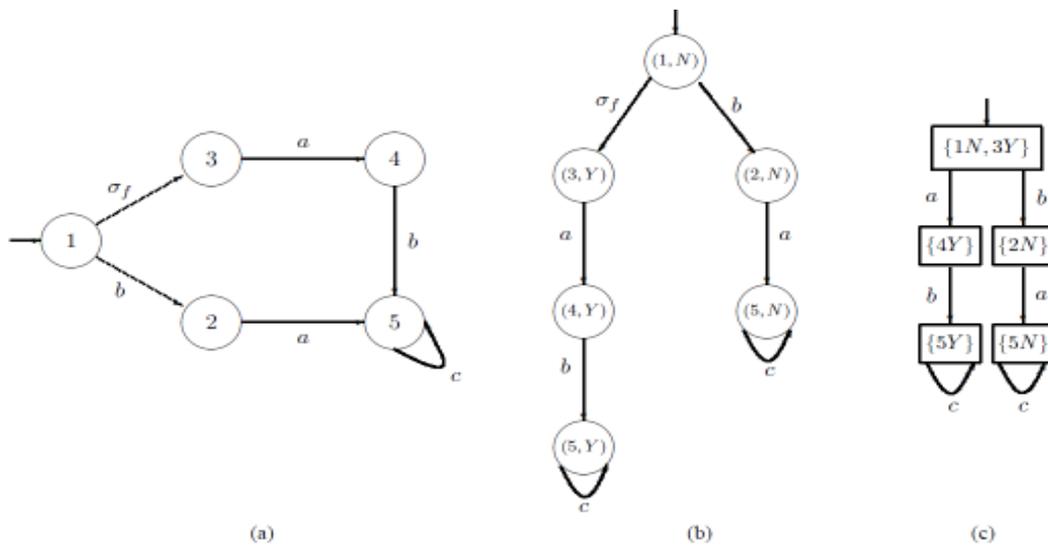


Figura 4.4: (a) Autômato  $G$ ; (b) Composição paralela entre  $G$  e  $A_I$ ; (c)  $G_d = Obs(G||A_I)$  (Basilio et al., 2010)

Um diagnosticador, tal como aquele representado na figura 4.4(c) é implementado na prática utilizando-se um computador digital (ou um controlador lógico programável). Seu estado inicial é feito igual a  $x_{o_d}$ , e após qualquer ocorrência de eventos observáveis, seu estado é atualizado de acordo com a função de transição de estados  $f_d$ . Quando o diagnosticador alcança um estado cujos rótulos são todos iguais a  $Y$ , ele se torna certo de que a falha ocorreu. Por exemplo, para o autômato da figura 4.4(a), suponha que tanto o sistema quanto o diagnosticador estejam nos seus respectivos estados iniciais. O estado inicial do diagnosticador  $\{1N, 3Y\}$  possui ambos os rótulos  $Y$  e  $N$ , isto é, o evento  $\sigma_f$ , por ser não-observável pode ter ocorrido sem que sua ocorrência seja percebida pelo diagnosticador. Essa possibilidade é levada em consideração pela componente  $3Y$ , significando que o sistema pode estar no estado 3 caso o evento de falha tenha ocorrido. Por outro lado, como o outro evento que pode ocorrer quando o sistema está no estado inicial é observável, então o diagnosticador deverá indicar que o sistema permaneceu no estado 1 e, por essa razão, a falha não ocorreu; essa possibilidade é representada pela componente  $1N$ . Dessa forma, o diagnosticador não poderá afirmar, com certeza, que a falha ocorreu, isto é, ele está incerto com relação à ocorrência ou não do evento associado à falha. Quando o sistema reporta ao diagnosticador a ocorrência do evento  $a$ , o seu estado muda para  $\{4Y\}$ , o que torna o diagnosticador certo da ocorrência de  $\sigma_f$ . Por outro lado, se o sistema reporta a

ocorrência do evento  $b$ , o diagnosticador muda para o estado  $\{2N\}$  e se torna certo da não ocorrência da falha, ou equivalentemente, que o sistema está em uma trajetória normal.

É importante ressaltar que, tendo em vista que  $G_d = Obs(G||A_I)$ , então uma vez que o diagnosticador tiver certeza da ocorrência da falha, não voltará atrás, isto é, todos os estados seguintes continuarão indicando a falha. Contudo, é possível para um diagnosticador mudar de um estado de não falha para duvidoso ou certo. Para maiores detalhes o leitor deve consultar Sampath et al., (1995) e Basílio et al.,(2010)

# Capítulo 5

## Sistema Diagnosticador de Falhas

### 5.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentadas a metodologia, o projeto e os resultados obtidos na aplicação do diagnosticador no processo de separação trifásica. Esta aplicação é a principal contribuição deste trabalho, tanto para a teoria de SED como para a prática de diagnósticos de falhas em geral.

Este tipo de diagnóstico é também denominado diagnóstico baseado na construção do modelo (Sampath et al., 1996), onde é fundamental partir de uma modelagem que contenha suficiente informação do comportamento e da instrumentação embutida.

Para a construção dos modelos em autômatos, foi fundamental a observação das simulações com a finalidade de analisar o comportamento total do processo, sendo esta utilizada como fonte de conhecimento para o projeto do diagnosticador. Foi considerado o processo funcionando em regime permanente, evitando as fases de partida e parada do processo, pois nessas fases acontecem transitórios lineares e não lineares, que proporcionam maior dificuldade no diagnóstico, sendo analisados transitórios referentes a perturbações que ocorrem quando o sistema está em regime de golfadas.

## 5.2 – Falhas na planta

Este sistema possui diversos tipos de falhas, alguns devido a distúrbios ao qual o processo é exposto e outros pelo simples mau funcionamento de alguns equipamentos. A falha é considerada um evento não observável que danifica e impede o processo de funcionar adequadamente. Esta consideração das falhas como sendo eventos não-observáveis é pelo fato de que as falhas são não-visíveis ou não-registráveis diretamente a partir das variáveis do processo. Em caso de falhas consideradas observáveis, a inferência de eventos se reduz em um problema trivial, onde é fácil registrar um tipo de falha determinado a partir de eventos observados.

Para começar o projeto, inicialmente é preciso determinar o tipo e as falhas que precisam ser modeladas. Dentre as diversas falhas que podem acontecer em um processo de separação trifásica, o presente trabalho foca no mau funcionamento das válvulas, especificamente quando essas ficam presas em qualquer ponto de sua faixa de operação. As razões que levaram a essas falhas vão além dos objetivos deste trabalho.

Como pode ser visto na figura 2.7, há seis válvulas possíveis de falharem, porém, neste trabalho, o diagnosticador será aplicado a quatro válvulas:  $S_g$ ,  $S_l$ ,  $S_{o3}$  e  $S_{u3}$ , responsáveis pelo controle das quatro variáveis do sistema: pressão do vaso separador, nível de óleo, diferencial de pressão do último hidrociclone e nível de água, respectivamente. A aplicação do diagnosticador nas válvulas  $S_{o1}$  e  $S_{o2}$  se tornaria repetitivo e não acrescentaria nenhuma informação nova no contexto desta dissertação, além de deixar o sistema mais complexo, dificultando, assim, a diagnose.

## 5.3 - Projeto dos diagnosticadores

O projeto dos diagnosticadores é dividido em duas partes: o gerador de eventos projetado em Matlab/Simulink® e o autômato diagnosticador desenvolvido no software Desuma® e posteriormente traduzido para o Matlab/Stateflow®. O Desuma® foi construído para implementar autômatos.

Com uma interface gráfica e comandos intuitivos, este pacote facilita a implementação de autômatos além permitir também as operações entre autômatos. O Stateflow é um toolbox do Matlab® que permite modelar sistemas a eventos discretos dentro do Simulink. O Stateflow possui uma única estrutura chamada Chart, que serve para representar um sistema a eventos discretos. O Chart pode conectar-se com outros blocos do Simulink, de tempo contínuo ou discreto, para formar modelos de sistemas híbridos que podem ser muito úteis na análise do comportamento de tais sistemas por intermédio de simulações (Rivera et al., 2007).

### **5.3.1 – Modelagem do processo**

Para modelar o processo em autômatos, foi necessário fazer observações através de simulações para assim analisar o comportamento do sistema em diversas situações, distúrbio e falhas, sendo essas informações utilizadas como referencias para o projeto do diagnosticador. Em situações reais, este conhecimento é obtido a partir de dados históricos e experiência dos operadores.

A construção do modelo do processo é feita modelando-se as partes relevantes do sistema em separado. Em nosso caso, os componentes a serem considerados são as válvulas, os controladores, sensor de pressão, sensores de nível (óleo e água) e o sensor de DPR do hidrociclone DC. A nível de modelagem, os autômatos a serem construídos são especificamente os autômatos das válvulas e dos controladores, sendo os sensores intrinsecamente modelados nesses autômatos, como eventos.

#### **5.3.1.1 – Válvulas**

Após a observação do comportamento das válvulas, foi feito o modelo das mesmas em autômato com estados e eventos descrito nas Tabelas 5.1 e 5.2. Como o comportamento das válvulas  $S_g$ ,  $S_l$ ,  $S_{o3}$  e  $S_{u3}$  utilizadas no sistema são similares, o mesmo modelo é utilizado para representar as quatro válvulas trabalhadas nesta dissertação.

Tabela 5.1: Descrição dos estados do autômato válvula

<b>Estado</b>	<b>Descrição</b>
<b>v0</b>	Estado inicial
<b>vF</b>	Válvula fechando
<b>vA</b>	Válvula abrindo
<b>vpa</b>	Válvula abrindo/fechando parcialmente
<b>vpf</b>	Válvula presa fechando
<b>vpra</b>	Válvula presa abrindo

Os eventos que compõem a modelagem são eventos lidos a partir do sinal do controlador e eventos não observáveis, no caso das falhas, que pode ser visto na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Descrição dos eventos do autômato válvula

<b>Evento</b>	<b>Descrição</b>
<b>at</b>	Abri totalmente
<b>ft</b>	Fecha totalmente
<b>ap</b>	Abri parcialmente
<b>fp</b>	Fecha parcialmente
<b>pa</b>	Prendeu aberta
<b>pf</b>	Prendeu fechada

O modelo em autômato da válvula está mostrado na Figura 5.1:

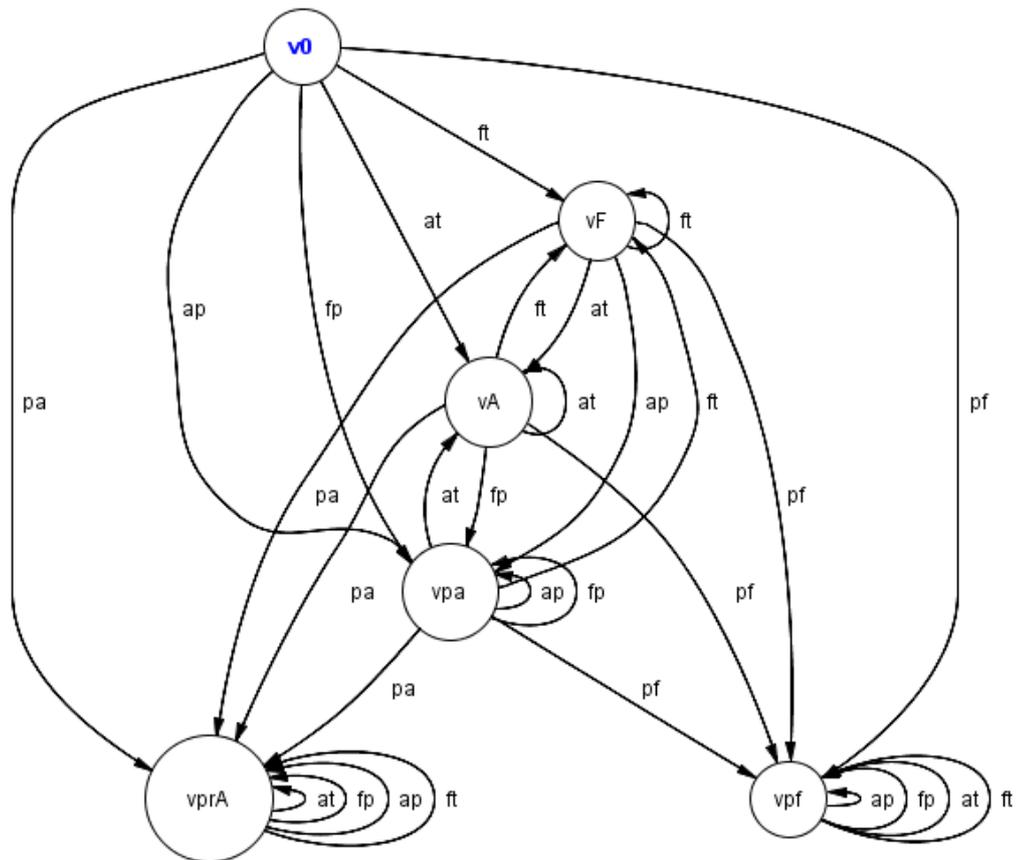


Figura 5.1: Autômato da válvula

Como não se sabe o estado real da válvula ao se iniciar o sistema diagnosticador, o autômato da figura 5.1 se inicia no estado v0, podendo receber qualquer um dos eventos ap, at, fp, ft, pa ou pf. Por exemplo, supondo que ocorreu o evento ft, então o autômato sai do estado v0 e passa para o estado vF. Neste estado os eventos possíveis são ft, at, ap, pf ou pa. Assim, caso, por exemplo, ocorra o evento ap, o autômato sairá do estado vF para o estado vpa, e assim o funcionamento do autômato segue até o desligamento do sistema.

### 5.3.1.2 – Controladores

A modelagem dos controladores é mais complicada. É necessário conhecer o tipo do controlador (P, PI, PID, preditivo, robusto, etc.) e o modo de como ele atua no sistema. Após vários testes e análises de como o controlador influencia no sistema, percebeu-se a necessidade de informações adicionais

para montar um modelo em autômato. Com a finalidade de enriquecer o conteúdo das informações foi preciso a adição de um sensor virtual.

Um sensor virtual nada mais é do que um modelo que estima, em tempo real, a variável desejada a partir de dados medidos da planta. Um sensor virtual é usado para inferir uma variável da planta para o qual nenhum sensor é instalado (Latufo e Garcia, 2008). Aqui, além da medição da variável de interesse, o sensor virtual é construído para fornecer informações adicionais para o sistema diagnosticador. Por exemplo, em adição à informação que um sensor de nível de óleo produz, o sensor virtual indicará, em tempo real, a condição transitória do nível, isto é: nível de óleo subindo, nível de óleo descendo ou nível de óleo estável.

Para extrair essa informação do sistema, o sensor virtual foi implementado a partir do sensor de nível de óleo e com um tratamento de sinais relativamente simples, onde o sinal do nível é amostrado, com tempo de amostragem  $t_a = 8 s$ , tempo este encontrado através do método de tentativa e erro, e atrasado em uma amostragem. Então, o sinal atrasado é subtraído do sinal amostrado sem atraso, é passado por um filtro e por um tratamento digital para discriminar a condição transitória do nível. Na figura 5.2 é mostrado como o sensor virtual foi implementado em Matlab/Simulink®. As saídas do n0, n+ e n- do sensor são discutidas na Tabela 5.3.

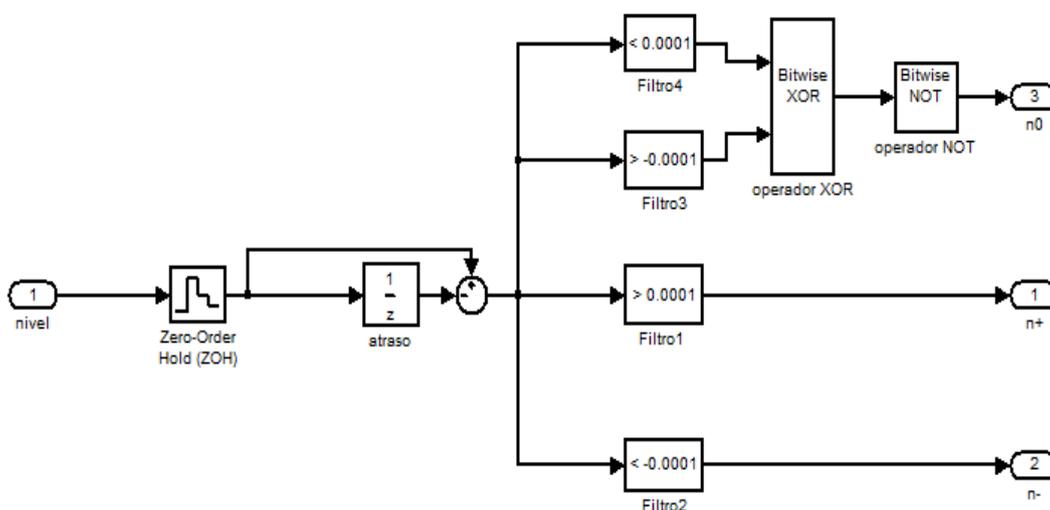


Figura 5.2: Sensor virtual de condição do nível de óleo

Tabela 5.3: Descrição das saídas do sensor virtual

Saída	Descrição
n0	Nível estável
n+	Nível subindo
n-	Nível descendo

Para montar o diagnosticador, que tem como princípio detectar os sintomas do sistema, quanto mais informações sobre o processo, mais preciso é seu funcionamento. O sistema somente com o sensor de nível, identifica apenas se o nível está acima ou abaixo do set point, não tendo, assim, informações suficientes para um diagnosticador funcionar com o mínimo de satisfação. Por essa razão, o sensor virtual de nível em conjunto com o sensor de nível, fornece as informações mínimas necessárias para que o modelo em autômato do controlador consiga fidelizar o comportamento do processo e, conseqüentemente, permitir projetar um diagnosticador que funcione de maneira adequada.

Após vários testes, foi desenvolvido o modelo do controlador de nível de óleo em autômato como mostrado na figura 5.3, cujos estados e eventos são descritos nas Tabelas 5.4 e 5.5 respectivamente. Esse modelo foi desenvolvido supondo que o controlador opera sempre em modo automático. Caso seja necessário considerar também a operação em manual, o modelo em autômato do controlador deve ser convenientemente alterado.

Tabela 5.4: Descrição dos estados do autômato controlador de nível de óleo

Estados	Descrição
c0	Controlador estável
cl-	Controlador abaixo do set point e descendo
cl+	Controlador abaixo do set point e subindo
ch+	Controlador acima do set point e subindo
ch-	Controlador acima do set point e descendo

Assim, os eventos que compõem a modelagem do controlador de nível de óleo são eventos lidos a partir do sinal do sensor de nível de óleo, conforme listados na Tabela 5.5, ou do próprio controlador que pode ser visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.5: Descrição dos eventos do autômato controlador de nível de óleo

Eventos	Descrição
n0	Nível estável
nl-	Nível abaixo do set point e descendo
nl+	Nível abaixo do set point e subindo
nh+	Nível acima do set point e subindo
nh-	Nível acima do set point e descendo

O modelo do autômato do controlador de nível de óleo é mostrado na figura 5.3.

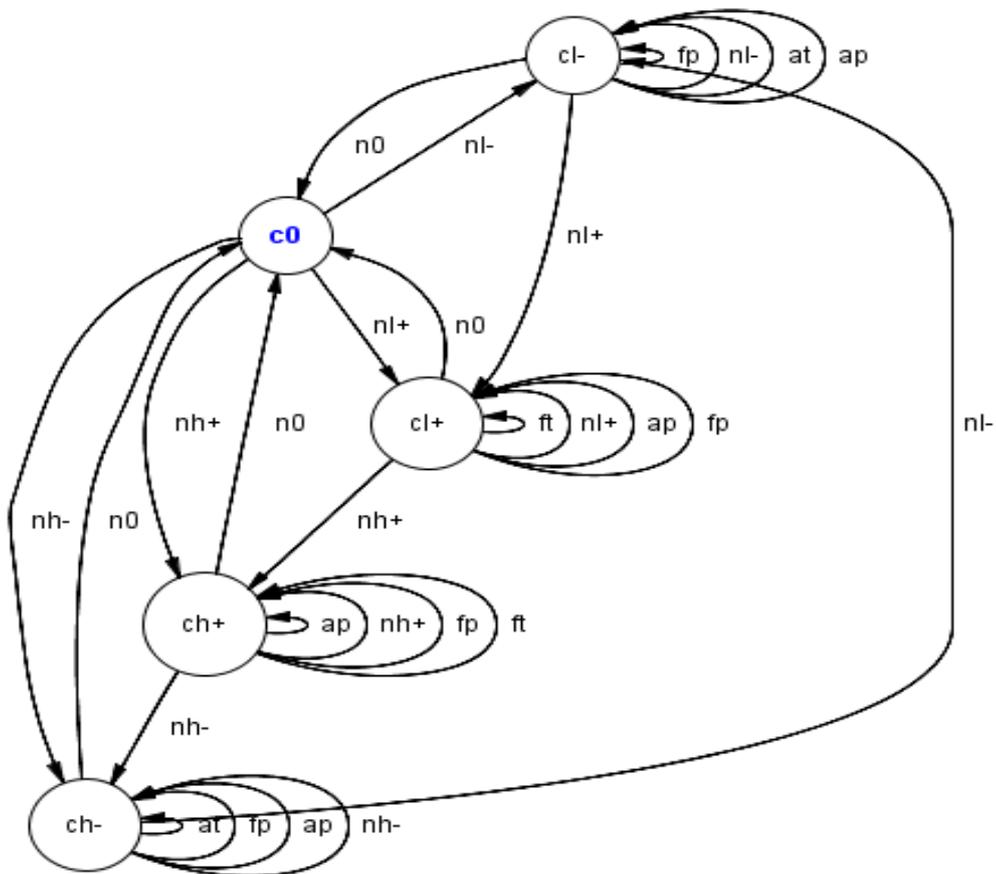


Figura 5.3: Autômato do controlador

O autômato da figura 5.3 segue o mesmo padrão de comportamento do autômato da figura 5.1, inicia-se no estado c0, podendo receber os eventos nh+, nh-, nl+ ou nl-. Assim, supondo que ocorra o evento nh-, então o autômato sai do estado c0 e passa para o estado ch-. Neste estado os eventos possíveis são at, ap, fp, nh- ou n0 (Tabelas 5.2 e 5.5). Dessa forma, caso ocorra o evento nl-, o

autômato muda do estado ch- para o estado cl-, e assim o funcionamento do autômato segue até o desligamento do sistema.

Como o comportamento dos controladores utilizados no sistema são similares, o mesmo modelo do controlador de nível de óleo (controlador 2) é utilizado para representar os quatro controladores usados na operação processo.

### 5.3.1.3 – Modelo da planta

Após a modelagem das principais partes do sistema, é necessário juntar os dois autômatos em apenas um por meio da composição paralela visto no Capítulo 3. O resultado desta operação será um autômato que representa o modelo comportamental do sistema separador trifásico que será aplicado a cada par válvula/controlador para a construção do diagnosticador . Este autômato é demasiado grande com 30 estados e 200 transições, não cabendo apresentar nesta dissertação. Porém, uma forma alternativa encontrada para representar este autômato é através de uma Tabela 5.6 de estados e transições mostrada a seguir:

Tabela 5.6: Autômato da planta

eventos estados	ap	at	fp	ft	n0	nh+	nh-	nl+	nl-	pa	pf
c0,v0	-	-	-	-	-	ch+,v0	ch-,v0	cl+,v0	cl-,v0	c0,vpra	c0,vprf
c0,va	-	-	-	-	-	ch+,va	ch-,va	cl+,va	cl-,va	c0,vpra	c0,vprf
c0,vf	-	-	-	-	-	ch+,vf	ch-,vf	cl+,vf	cl-,vf	c0,vpra	c0,vprf
c0,vpa	-	-	-	-	-	ch+,vpa	ch-,vpa	cl+,vpa	cl-,vpa	c0,vpra	c0,vprf
c,vpra	-	-	-	-	-	ch+,vpra	ch-,vpra	cl+,vpra	cl-,vpra	-	-
c0,vprf	-	-	-	-	-	ch+,vprf	ch-,vprf	cl+,vprf	cl-,vprf	-	-
ch+,v0	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,v0	ch+,v0	ch-,v0	-	-	ch+,vpra	ch+,vprf
ch+,va	-	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,va	ch+,va	ch-,va	-	-	ch+,vpra	ch+,vprf
ch+,vf	ch+,vpa	-	-	ch+,vf	c0,vf	ch+,vf	ch-,vf	-	-	ch+,vpra	ch+,vprf
ch+,vpa	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,vpa	ch+,vpa	ch-,vpa	-	-	c0,vpra	c0,vprf
ch+,vpra	ch+,vpra	-	ch+,vpra	ch+,vpra	n0,vpra	ch+,vpra	ch-,vpra	-	-	-	-
ch+,vprf	ch+,vprf	-	ch+,vprf	ch+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	ch-,vprf	-	-	-	-
ch-,v0	ch-,vpa	ch-,va	ch-,va	-	c0,v0	-	ch-,v0	-	cl-,v0	ch-,vpra	ch-,vprf
ch-,va	-	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,va	-	ch-,va	-	cl-,va	c0,vpra	c0,vprf
ch-,vf	ch-,vpa	ch-,va	-	-	c0,vf	-	ch-,vf	-	cl-,vf	ch-,vpra	ch-,vprf
ch-,vpa	ch-,vpa	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,vpa	-	ch-,vpa	-	cl-,vpa	ch-,vpra	ch-,vprf
ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	-	c0,vprf	-	ch-,vpra	-	cl-,vpra	-	-
ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	-	c0,vprf	-	ch-,vprf	-	cl-,vprf	-	-
cl+,v0	cl+,vpa	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,v0	ch+,v0	-	cl+,v0	-	cl+,vpra	cl+,vprf
cl+,va	-	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,va	ch+,va	-	cl+,va	-	cl+,vpra	cl+,vprf
cl+,vf	cl+,vpa	-	-	cl+,vf	c0,vf	ch+,vf	-	cl+,vf	-	cl+,vpra	cl+,vprf
cl+,va	cl+,va	-	cl+,va	cl+,vf	c0,vpa	-	-	cl+,va	-	cl+,vpra	cl+,vprf
cl+,vpra	cl+,vpra	-	cl+,vpra	cl+,vpra	c0,vpra	ch+,vpra	-	cl+,vpra	-	-	-
cl+,vprf	cl+,vprf	-	cl+,vprf	cl+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	-	cl+,vprf	-	-	-
cl-,v0	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	c0,v0	-	-	cl+,v0	cl-,v0	cl-,vpra	cl-,vprf
cl-,va	-	cl-,va	cl-,vpa	-	n0,va	-	-	cl+,va	cl-,va	cl-,vpra	cl-,vprf
cl-,vf	cl-,vpa	cl-,va	-	-	c0,vf	-	-	cl+,vf	cl-,vf	cl-,vpra	cl-,vprf
cl-,vpa	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	v0,vpa	-	-	cl+,vpa	cl-,vpa	cl-,vpra	cl-,vprf
cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	-	c0,vpra	-	-	cl+,vpra	cl-,vpra	-	-
cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	-	c0,vprf	-	-	cl+,vprf	cl-,vprf	-	-

## 5.3.2 – Construção do modelo com mapas de sensores

### 5.3.2.1 - Introdução

Existem duas variantes para a definição de autômatos que são úteis em modelagem de sistemas: autômato de Moore e autômato de Mealy.

- Autômatos de Moore são autômatos com saídas nos estados. Existe uma função que atribui uma saída para cada estado. Esta saída é emitida pelo autômato quando ele entra no estado. Um autômato de Moore com as saídas associadas é mostrado na figura 5.4.
- Autômato de Mealy são autômatos de entrada/saída nas transições. Transições são eventos na forma de *evento de entrada/evento de saída*, como mostrado na figura 5.5. O conjunto dos eventos de saídas,  $E_{output}$ , não precisa ser o mesmo do conjunto de eventos de entrada,  $E_{input}$ . A interpretação da transição  $e_i/e_o$  a partir do estado  $x$  para o estado  $y$  é a seguinte: quando o sistema está no estado  $x$ , se o autômato recebe o evento de entrada  $e_i$ , ele fará uma transição para o estado  $y$  e o processo emitirá o evento saída  $e_o$  (Sampath et al., 1996).

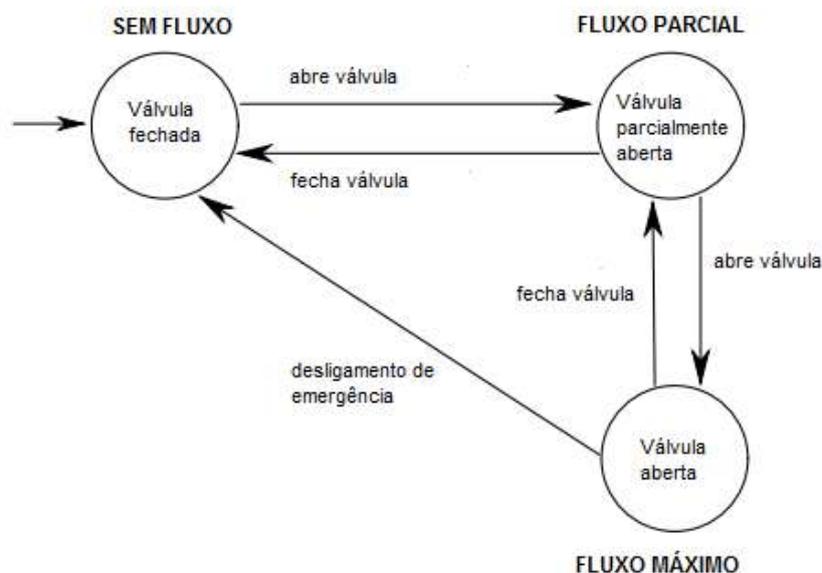


Figura 5.4: Autômato de Moore (adaptado de Cassandras et al., 1999)

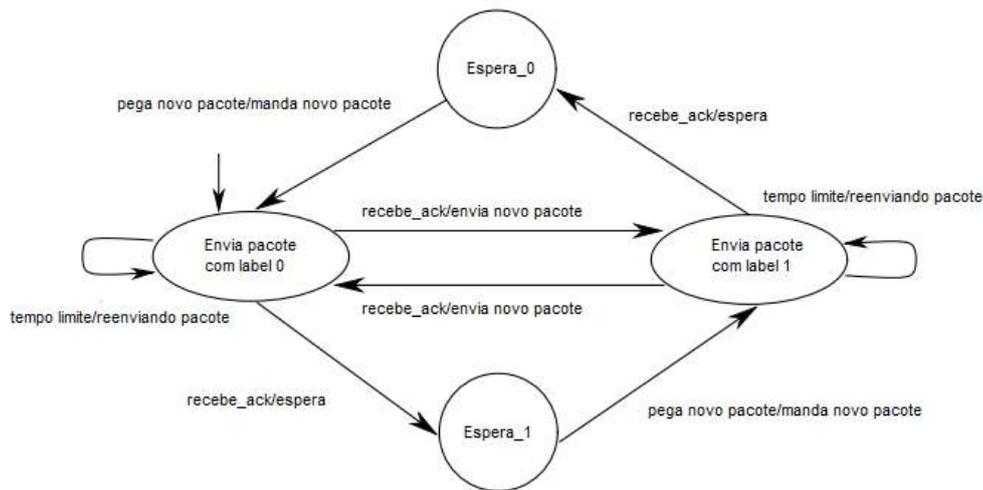


Figura 5.5: Autômato de Mealy (adaptado de Cassandras et al., 1999)

Pode-se facilmente verificar que é possível transformar um autômato Moore em autômato Mealy, o qual pode ser interpretado como a forma da figura 5.6.

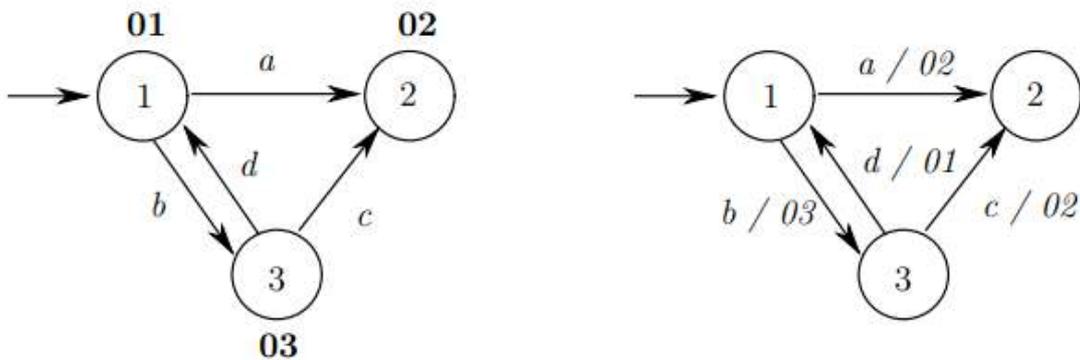


Figura 5.6: Conversão de autômatos (adaptado de Cassandras e Lafortune., 2008)

### 5.3.2.2 – Modelo com mapas de sensores

Vamos considerar a conversão do autômato de Moore, porém, desta vez, considerando a presença de eventos não observáveis no modelo do sistema. Esta conversão consiste em renomear a transição do estado  $x$  para o estado  $y$ , trocando o evento  $a$  por um novo evento,  $(a, \text{saída do estado } y)$ . Isto funciona bem se o evento  $a$  for observável. A interpretação do novo evento é “evento  $a$

acontece e imediatamente é seguido por uma “saída” (leitura do sensor) igual à saída do estado  $y$ ”. No entanto, esta conversão é inadequada se  $a$  for um evento não observável. O evento rotulado  $a$  não é observável, mas a saída do estado  $y$  é observável pela definição.

Para modificar o procedimento de conversão para esta situação, dois casos devem ser considerados: (i) a saída do estado  $x$  e a saída do estado  $y$  são as mesmas. (ii) as saídas dos estados  $x$  e  $y$  são diferentes. Neste primeiro caso, a transição de  $x$  para  $y$  devido ao evento  $a$  é inteiramente não observável, desde que  $a$  não seja observável e nenhuma mudança no estado de saída for observada. Assim, nesse caso, o rótulo da transição continua  $a$ , sem menção de saída do estado. No segundo caso, no entanto, a mudança de saída do estado será observada depois da ocorrência do evento não observado  $a$ . Para capturar isto, em um modelo de sistema sem saídas de estado, adicionamos um novo estado para cada transição, conhecido como  $x_{x,a,y}$ , e definimos duas transições: (i) evento não observável  $a$ , de  $x$  para  $x_{x,a,y}$  e (ii) transição observável do estado  $x_{x,a,y}$  para o estado  $y$  rotulado como *saída trocada de “saída do estado  $x$ ” para “saída do estado  $y$ ”*. Dessa maneira, a mudança observada da adição do estado é capturada no modelo como um evento observável. Na prática, as saídas dos estados são resultados das saídas dos sensores.

Sendo assim, a saída dos sensores dependerá do estado do autômato. A conversão do autômato de Moore requer a adição de um novo estado,  $x_{novo}$ , para a nomeação de todos os eventos observáveis. A adição do novo estado  $x_{novo}$  é necessária porque os eventos não observáveis de um estado para o outro causam uma mudança na leitura dos sensores, o que indicará a ocorrência de falha ou não (Sampath et al., 1996).

O autômato da planta deverá ser convertido à forma com a adição dos novos estados  $x_{novos}$ , e para isso foi feita um mapa de sensores para cada tipo de variável a ser controlada. No nosso caso os tipos de variáveis são: nível (nível da água e nível do óleo) e pressão (pressão do gás e o diferencial de pressão no hidrociclone DC). Estes mapas de sensores, mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8, serão fundamentais na conversão do autômato da planta para,

posteriormente, criar os diagnosticadores, pois, a ocorrência dos eventos será registrada pelas leituras dos sensores correspondentes aos estados indicados na Tabela 5.7.

Assim, a conversão do autômato, baseado no mapa da Tabela 5.7 será útil para o diagnóstico de falhas da válvula do gás ( $S_g$ ) e da válvula do diferencial de pressão do hidrociclone DC ( $S_{o3}$ ). A conversão do autômato baseado no mapa da Tabela 5.8, será útil para o diagnóstico das falhas da válvula de nível de óleo ( $S_l$ ) e da válvula de nível de água ( $S_{u3}$ ).

Tabela 5.7: Mapa de sensores da planta em relação às válvula de pressão do gás e do diferencial de pressão do hidrociclone DC

Nº do estado	Nome do estado	Leitura do sensor
1	c0,v0	n0
2	c0,vprA	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
3	cl-,v0	n-,nl
4	cl+,v0	n+,nl
5	ch-,v0	n-,nh
6	c0,vprF	(at,n+) ou (at,n0) ou (ap,n0)
7	ch+,v0	n+,nh
8	cl+,vpra	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
9	ch+,vpra	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
10	ch-,va	n-,nh
11	cl-,va	n-,nl
12	ch-,vpra	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
13	ch-,vpa	n-,nh
14	ch-,vprf	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
15	co,va	n0
16	ch+,vpa	n+,nh
17	ch+,vf	n+,nh
18	ch+,vprf	(at,n+) ou (at,n0) ou (ap,n0)
19	cl+,vf	n+,nl
20	cl+,vpa	n+,nl
21	cl+,vprf	(at,n+) ou (at,n0) ou (ap,n0)
22	c0,vf	n0
23	cl-,vprf	(at,n+) ou (at,n0) ou (ap,n0)
24	n0,vpa	n0
25	cl+,va	n+,nl
26	ch+,va	n+,nh
27	ch-,vf	n-,nh
28	cl-,vf	n-,nl
29	cl-,vpra	(fp,n0) ou (ft,n0) ou (ft,n-)
30	cl-,vpa	n-,nl

Tabela 5.8: Mapa de sensores da planta em relação às válvulas de óleo e da válvula de água

Nº do estado	Nome do estado	Leitura do sensor
1	c0,v0	n0
2	c0,vprA	ft,n-
3	cl-,v0	n-,nl
4	cl+,v0	n+,nl
5	ch-,v0	n-,nh
6	c0,vprF	at,n+
7	ch+,v0	n+,nh
8	cl+,vpra	ft,n-
9	ch+,vpra	ft,n-
10	ch-,va	n-,nh
11	cl-,va	n-,nl
12	ch-,vpra	ft,n-
13	ch-,vpa	n-,nh
14	ch-,vprf	at,n+
15	c0,va	n0
16	ch+,vpa	n+,nh
17	ch+,vf	n+,nh
18	ch+,vprf	at,n+
19	cl+,vf	n+,nl
20	cl+,vpa	n+,nl
21	cl+,vprf	at,n+
22	c0,vf	n0
23	cl-,vprf	at,n+
24	c0,vpa	n0
25	cl+,va	n+,nl
26	ch+,va	n+,nh
27	ch-,vf	n-,nh
28	cl-,vf	n-,nl
29	cl-,vpra	ft,n-
30	cl-,vpa	n-,nl

As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram a planta com os mapas de sensores das pressões e dos níveis.

Tabela 5.9: Autômato da planta com o mapa de sensores de pressão

eventos estados	ap	at	fp	Ft	n0	nh+	nh-	nl+	nl-	pa	pf	(ft,n0)/(ft,n-)/ (fp,n0)	(at,n+)/(at,n0)/ (ap,n0)
c0,v0 1	-	-	-	-	-	ch+,v0	ch-,v0	cl+,v0	cl-,v0	X4	X6	-	-
c0,va 15	-	-	-	-	-	ch+,va	ch-,va	cl+,va	cl-,va	X3	X5	-	-
c0,vf 22	-	-	-	-	-	ch+,vf	ch-,vf	cl+,vf	cl-,vf	X1	X8	-	-
c0,vpa 24	-	-	-	-	-	ch+,vpa	ch-,vpa	cl+,vpa	cl-,vpa	X2	X7	-	-
c0,vpra	-	-	-	-	-	ch+,vpra	ch-,vpra	cl+,vpra	cl-,vpra	-	-	-	-
c0,vprf	-	-	-	-	-	ch+,vprf	ch-,vprf	cl+,vprf	cl-,vprf	-	-	-	-
ch+,v0 7	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,v0	ch+,v0	ch-,v0	-	-	X13	X28	-	-
ch+,va 26	-	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,va	ch+,va	ch-,va	-	-	X16	X25	-	-
ch+,vf 17	ch+,vpa	-	-	ch+,vf	c0,vf	ch+,vf	ch-,vf	-	-	X15	X26	-	-
ch+,vpa 16	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,vpa	ch+,vpa	ch-,vpa	-	-	X14	X27	-	-
ch+,vpra	ch+,vpra	-	ch+,vpra	ch+,vpra	n0,vpra	ch+,vpra	ch-,vpra	-	-	-	-	-	-
ch-,vprf	ch+,vprf	-	ch+,vprf	ch+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	ch-,vprf	-	-	-	-	-	-
ch-,v0 5	ch-,vpa	ch-,va	ch-,va	-	c0,v0	-	ch-,v0	-	cl-,v0	X21	X19	-	-
ch-,va 10	-	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,va	-	ch-,va	-	cl-,va	X24	X17	-	-
ch-,vf 27	ch-,vpa	ch-,va	-	-	c0,vf	-	ch-,vf	-	cl-,vf	X22	X20	-	-
ch-,vpa 13	ch-,vpa	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,vpa	-	ch-,vpa	-	cl-,vpa	X23	X18	-	-
ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	-	c0,vprf	-	ch-,vpra	-	cl-,vpra	-	-	-	-
ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	-	c0,vprf	-	ch-,vprf	-	cl-,vprf	-	-	-	-
cl+,v0 4	cl+,vpa	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,v0	ch+,v0	-	cl+,v0	-	X12	X29	-	-
cl+,va 25	-	-	vl+,vpa	cl+,vf	c0,va	ch+,va	-	cl+,va	-	X11	X32	-	-
cl+,vf 19	cl+,vpa	-	-	cl+,vf	c0,vf	ch+,vf	-	cl+,vf	-	X9	X30	-	-
cl+,vpa 20	cl+,vpa	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,vpa	-	-	cl+,vpa	-	X10	X31	-	-
cl+,vpra	cl+,vpra	-	cl+,vpra	cl+,vpra	c0,vpra	ch+,vpra	-	cl+,vpra	-	-	-	-	-
cl+,vprf	cl+,vprf	-	cl+,vprf	cl+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	-	cl+,vprf	-	-	-	-	-
cl-,v0 3	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	c0,v0	-	-	cl-,v0	cl-,v0	X36	X40	-	-
cl-,va 11	-	cl-,va	cl-,vpa	-	n0,va	-	-	cl-,va	cl-,va	X33	X37	-	-
cl-,vf 28	cl-,vpa	cl-,va	-	-	c0,vf	-	-	cl-,vf	cl-,vf	X35	X39	-	-
cl-,vpa 30	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	v0,vpa	-	-	cl-,vpa	cl-,vpa	X34	X38	-	-
cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	-	c0,vpra	-	-	cl-,vpra	cl-,vpra	-	-	-	-
cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	-	c0,vprf	-	-	cl-,vprf	cl-,vprf	-	-	-	-
X1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf

Tabela 5.10: Autômato da planta com o mapa de sensores de nível

eventos estados	ap	at	fp	ft	n0	nh+	nh-	nl+	nl-	pa	pf	(ft,n-)	(at,n+)
c0,v0 1	-	-	-	-	-	ch+,v0	ch-,v0	cl+,v0	cl-,v0	X4	X6	-	-
c0,va 15	-	-	-	-	-	ch+,va	ch-,va	cl+,va	cl-,va	X3	X5	-	-
c0,vf 22	-	-	-	-	-	ch+,vf	ch-,vf	cl+,vf	cl-,vf	X1	X8	-	-
c0,vpa 24	-	-	-	-	-	ch+,vpa	ch-,vpa	cl+,vpa	cl-,vpa	X2	X7	-	-
c0,vpra	-	-	-	-	-	ch+,vpra	ch-,vpra	cl+,vpra	cl-,vpra	-	-	-	-
c0,vprf	-	-	-	-	-	ch+,vprf	ch-,vprf	cl+,vprf	cl-,vprf	-	-	-	-
ch+,v0 7	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,v0	ch+,v0	ch-,v0	-	-	X13	X28	-	-
ch+,va 26	-	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,va	ch+,va	ch-,va	-	-	X16	X25	-	-
ch+,vf 17	ch+,vpa	-	-	ch+,vf	c0,vf	ch+,vf	ch-,vf	-	-	X15	X26	-	-
ch+,vpa 16	ch+,vpa	-	ch+,vpa	ch+,vf	c0,vpa	ch+,vpa	ch-,vpa	-	-	X14	X27	-	-
ch+,vpra	ch+,vpra	-	ch+,vpra	ch+,vpra	n0,vpra	ch+,vpra	ch-,vpra	-	-	-	-	-	-
ch+,vprf	ch+,vprf	-	ch+,vprf	ch+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	ch-,vprf	-	-	-	-	-	-
ch-,v0 5	ch-,vpa	ch-,va	ch-,va	-	c0,v0	-	ch-,v0	-	cl-,v0	X21	X19	-	-
ch-,va 10	-	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,va	-	ch-,va	-	cl-,va	X24	X17	-	-
ch-,vf 27	ch-,vpa	ch-,va	-	-	c0,vf	-	ch-,vf	-	cl-,vf	X22	X20	-	-
ch-,vpa 13	ch-,vpa	ch-,va	ch-,vpa	-	c0,vpa	-	ch-,vpa	-	cl-,vpa	X23	X18	-	-
ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	ch-,vpra	-	c0,vpra	-	ch-,vpra	-	cl-,vpra	-	-	-	-
ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	ch-,vprf	-	c0,vprf	-	ch-,vprf	-	cl-,vprf	-	-	-	-
cl+,v0 4	cl+,vpa	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,v0	ch+,v0	-	cl+,v0	-	X12	X29	-	-
cl+,va 25	-	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,va	ch+,va	-	cl+,va	-	X11	X32	-	-
cl+,vf 19	cl+,vpa	-	-	cl+,vf	c0,vf	ch+,vf	-	cl+,vf	-	X9	X30	-	-
cl+,vpa 20	cl+,vpa	-	cl+,vpa	cl+,vf	c0,vpa	-	-	cl+,vpa	-	X10	X31	-	-
cl+,vpra	cl+,vpra	-	cl+,vpra	cl+,vpra	c0,vpra	ch+,vpra	-	cl+,vpra	-	-	-	-	-
cl+,vprf	cl+,vprf	-	cl+,vprf	cl+,vprf	c0,vprf	ch+,vprf	-	cl+,vprf	-	-	-	-	-
cl-,v0 3	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	c0,v0	-	cl-,v0	-	cl-,v0	X36	X40	-	-
cl-,va 11	-	cl-,va	cl-,vpa	-	n0,va	-	-	cl+,va	cl-,va	X33	X37	-	-
cl-,vf 28	cl-,vpa	cl-,va	-	-	c0,vf	-	-	cl+,vf	cl-,vf	X35	X39	-	-
cl-,vpa 30	cl-,vpa	cl-,va	cl-,vpa	-	v0,vpa	-	-	cl+,vpa	cl-,vpa	X34	X38	-	-
cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	cl-,vpra	-	c0,vpra	-	-	cl+,vpra	cl-,vpra	-	-	-	-
cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	cl-,vprf	-	c0,vprf	-	-	cl+,vprf	cl-,vprf	-	-	-	-
X1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vpra	-
X13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vpra	-
X17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vprf
X18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vprf
X21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch-,vpra	-
X24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ch+,vprf
X29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c0,vpra	-
X30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl+,vprf
X33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vpra	-
X37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf
X40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cl-,vprf

### 5.3.3 – Diagnosticadores

O diagnosticador é construído segundo os passos (i) e (ii) da Seção 4.5.1 do Capítulo 4. Como mencionado anteriormente, a composição desse autômato contém 30 estados e 200 transições, sendo demasiadamente grande para apresentá-la neste trabalho. Porém, uma forma alternativa encontrada para representar estes autômatos é através das Tabela 5.11 e 5.12 de estados e transições mostradas a seguir, onde a coluna da esquerda são os estados atuais, a primeira linha são os eventos e a intersecção entre a primeira coluna e a primeira linha resulta no próximo estado do autômato.

Tabela 5.11: Diagnosticador de falhas das válvulas de água e óleo

eventos estados	ap-/ap+	at-	fp-/fp+	ft+	n0	nh+	nh-	nl+	nl-	(ft,n-)	(at,n+)
1NY (inicial)	-	-	-	-	-	7NY	5NY	4NY	3NY	2Y	6Y
2Y	-	-	-	-	-	9Y	12Y	8Y	29Y	-	-
3NY	30NY	11NY	30NY	-	1NY	-	-	4NY	3NY	29Y	23Y
4NY	20NY	-	20NY	19NY	1NY	7NY	-	4NY	-	8Y	21Y
5NY	13NY	10NY	13NY	-	1NY	-	5NY	-	3NY	12Y	14Y
6Y	-	-	-	-	-	18Y	14Y	21Y	23Y	-	-
7NY	16NY	-	16NY	17NY	1NY	7NY	5NY	-	-	9Y	18Y
8Y	8Y	-	8Y	-	2Y	9Y	-	8Y	-	8Y	-
9Y	9Y	-	9Y	9Y	2Y	9Y	12Y	-	-	-	-
10NY	-	10NY	13NY	-	15NY	-	10NY	-	11NY	12Y	14Y
11NY	-	11NY	30NY	-	15NY	-	-	25NY	11NY	29Y	23Y
12Y	12Y	12Y	12Y	-	2Y	-	12Y	-	29Y	-	-
13NY	13NY	10NY	13NY	-	14NY	-	13NY	-	30NY	12Y	14Y
14Y	14Y	14Y	14Y	-	6Y	-	14Y	-	23Y	-	-
15NY	16NY	-	16NY	17NY	24NY	16NY	13NY	-	-	9Y	18Y
16NY	16NY	-	16NY	17NY	24NY	16NY	13NY	-	-	9Y	18Y
17NY	16NY	-	-	17NY	22NY	17NY	27NY	-	-	9Y	18Y
18Y	18Y	-	18Y	18Y	6Y	18Y	14Y	-	-	-	-
19NY	20NY	-	-	19NY	22NY	17NY	-	19NY	-	8Y	21Y
20NY	20NY	-	20NY	19NY	24NY	16NY	-	20NY	-	8Y	21Y
21Y	21Y	-	21Y	21Y	6Y	18Y	-	21Y	-	-	-
22NY	-	-	-	-	-	17Y	27NY	19Y	28NY	2Y	6Y
23Y	23Y	23Y	23Y	-	6Y	-	-	21Y	23Y	-	-
24NY	-	-	-	-	-	16NY	13NY	20NY	30NY	2Y	6Y
25NY	-	-	20NY	19NY	15NY	26NY	-	25NY	-	8Y	21Y
26NY	-	-	16NY	17NY	15NY	26NY	10NY	-	-	9Y	18Y
27NY	13NY	10NY	-	-	22NY	-	27NY	-	28NY	12NY	14Y
28NY	30NY	11NY	-	-	22NY	-	-	19NY	28NY	29Y	23Y
29Y	29Y	29Y	29Y	-	2Y	-	-	8Y	29Y	-	-
30NY	30NY	11NY	30NY	-	24NY	-	-	20NY	30NY	29Y	23Y

Tabela 5.12: Diagnosticador de falhas das válvulas de gás e de diferencial de pressão

eventos estados	ap-/ap+	at-	fp-/fp+	ft+	n0	nh+	nh-	nl+	nl-	(ft,n0)/(ft,n-)/ (fp,n0)	(at,n+)/(at,n0)/ (ap,n0)
1NY (inicial)	-	-	-	-	-	7NY	5NY	4NY	3NY	2Y	6Y
2Y	-	-	-	-	-	9Y	12Y	8Y	29Y	-	-
3NY	30NY	11NY	30NY		1NY	-	-	4NY	3NY	29Y	23Y
4NY	20NY		20NY	19NY	1NY	7NY	-	4NY	-	8Y	21Y
5NY	13NY	10NY	13NY	-	1NY	-	5NY	-	3NY	12Y	14Y
6Y	-	-	-	-	-	18Y	14Y	21Y	23Y	-	-
7NY	16NY	-	16NY	17NY	1NY	7NY	5NY	-	-	9Y	18Y
8Y	8Y	-	8Y	-	2Y	9Y	-	8Y	-	8Y	-
9Y	9Y	-	9Y	9Y	2Y	9Y	12Y	-	-	-	-
10NY	-	10NY	13NY	-	15NY	-	10NY	-	11NY	12Y	14Y
11NY	-	11NY	30NY	-	15NY	-	-	25NY	11NY	29Y	23Y
12Y	12Y	12Y	12Y	-	2Y	-	12Y	-	29Y	-	-
13NY	13NY	10NY	13NY	-	14NY	-	13NY	-	30NY	12Y	14Y
14Y	14Y	14Y	14Y	-	6Y	-	14Y	-	23Y	-	-
15NY	16NY	-	16NY	17NY	24NY	16NY	13NY	-	-	9Y	18Y
16NY	16NY	-	16NY	17NY	24NY	16NY	13NY	-	-	9Y	18Y
17NY	16NY	-	-	17NY	22NY	17NY	27NY	-	-	9Y	18Y
18Y	18Y	-	18Y	18Y	6Y	18Y	14Y	-	-	-	-
19NY	20NY	-	-	19NY	22NY	17NY	-	19NY	-	8Y	21Y
20NY	20NY	-	20NY	19NY	24NY	16NY	-	20NY	-	8Y	21Y
21Y	21Y	-	21Y	21Y	6Y	18Y	-	21Y	-	-	-
22NY	-	-	-	-	-	17Y	27NY	19Y	28NY	2Y	6Y
23Y	23Y	23Y	23Y		6Y			21Y	23Y		
24NY	-	-	-	-	-	16NY	13NY	20NY	30NY	2Y	6Y
25NY	-	-	20NY	19NY	15NY	26NY	-	25NY	-	8Y	21Y
26NY	-	-	16NY	17NY	15NY	26NY	10NY	-	-	9Y	18Y
27NY	13NY	10NY	-	-	22NY	-	27NY	-	28NY	12NY	14Y
28NY	30NY	11NY	-	-	22NY	-	-	19NY	28NY	29Y	23Y
29Y	29Y	29Y	29Y	-	2Y	-	-	8Y	29Y	-	-
30NY	30NY	11NY	30NY	-	24NY	-	-	20NY	30NY	29Y	23Y

### 5.3.4 – Gerador de eventos

O gerador de eventos, como o próprio nome diz, é a parte do diagnosticador responsável de gerar os eventos para o autômato diagnosticador. Cada diagnosticador possui seu gerador de eventos, semelhantes entre si, com pequenas diferenças nas sintonias dos filtros.

Para construir um gerador de eventos que atendesse aos autômatos diagnosticadores, foram usados o sinal de erro para gerar os eventos nL+, nL-, nH+ e nH-, o sinal de nível usado para o sensor virtual, já discutido anteriormente, e o sinal de controle usado para gerar os eventos ap, fp, at e ft.

A partir do sinal de erro, é feito um tratamento onde o mesmo é amostrado com tempo de amostragem de 8 s e comparado positivamente e negativamente com o limiar 0,01, como mostrado na figura 5.7. Após o tratamento, é possível discriminar a parte positiva e a negativa do erro. Então é feito uma operação digital “and” com um gerador de onda quadrada, cujo sinal tem um período de 5 s, e a seguir, a saída digital passa por um detector de borda, do qual a saída já tem características de eventos. A seguir, o sinal é passado por um bloco que o concatenará, através de operações digitais, com a saída do sensor virtual, como mostrado na figura 5.7.

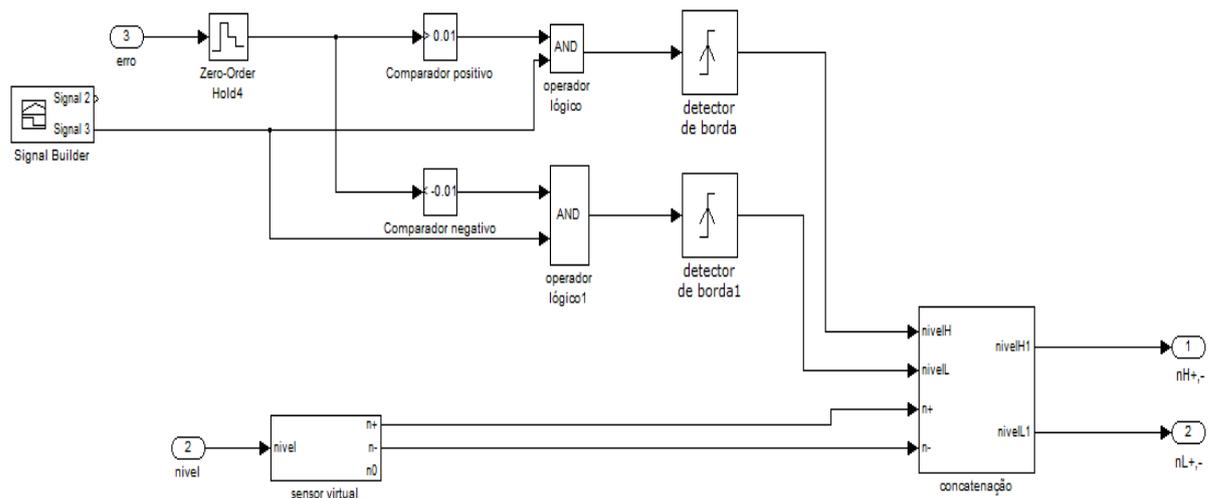


Figura 5.7: Gerador de eventos nl-, nl+, nh-, nh+

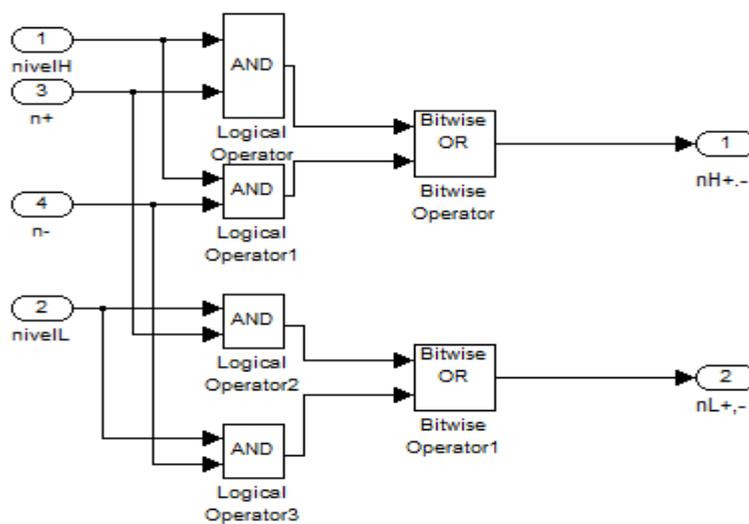


Figura 5.8: Bloco concatenação da figura 5.7

Para gerar os eventos restantes, o sinal do controlador é amostrado com tempo de amostragem de  $8\text{ s}$  e passado por um atrasador, com um atraso do tempo de amostragem. Então, o sinal atrasado é subtraído do sinal amostrado e comparado positivamente e negativamente. O sinal amostrado também é passado por um comparador e tanto o sinal amostrado atual como o atrasado são tratados digitalmente junto com uma onda quadrada e passado por um detector de borda, caracterizando-os como eventos ap, fp, at e ft. Este gerador é mostrado na figura 5.9. Depois, esses sinais são passados por um bloco que os concatenam com as saídas do sensor virtual, como é mostrado na figura 5.10.

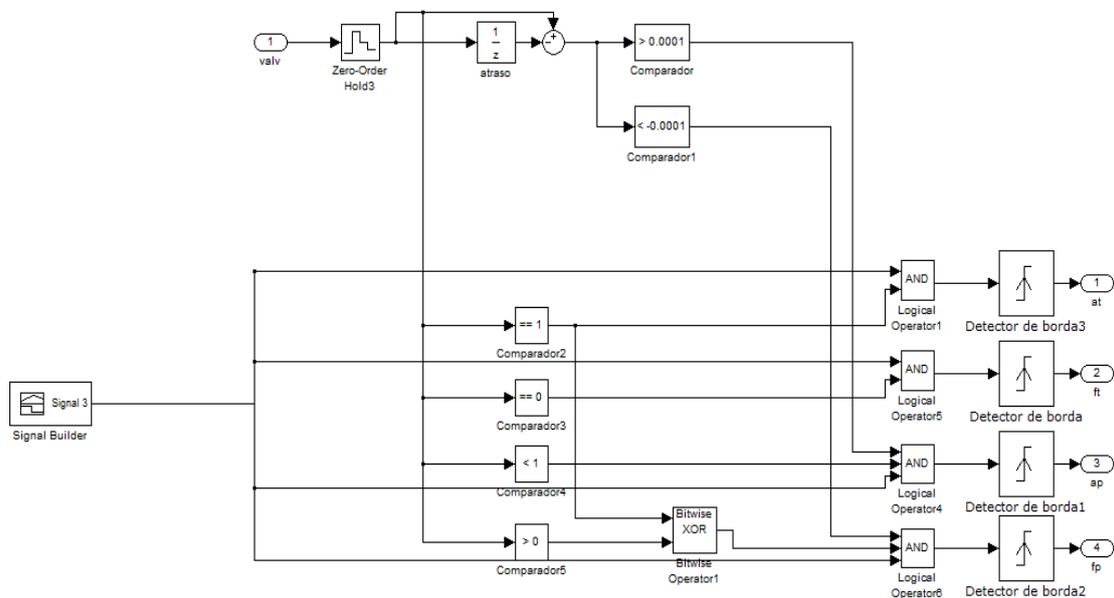


Figura 5.9: Bloco gerador dos eventos fp,ap,at,ft

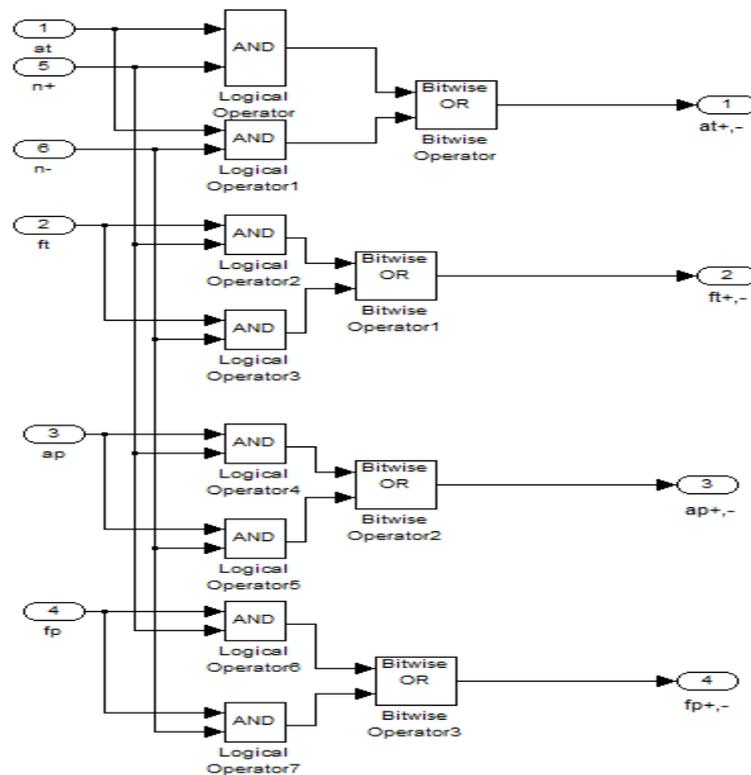


Figura 5.10: Bloco que concatena os eventos com os do sensor virtual

Com essas duas partes, o autômato diagnosticador e o gerador de eventos, os diagnosticadores já estão prontos para funcionar.

#### 5.4 – Simulações e Resultados

Como já foi dito anteriormente, as simulações foram feitas no software Matlab/Simulink/Stateflow®. O sistema foi simulado durante um tempo de observação de 5000 s, considerando primeiramente o processo com fluxo de alimentação constante (ou previamente controlado) para depois avaliar o desempenho do diagnosticador com o sistema sob alimentação em padrão de golfadas.

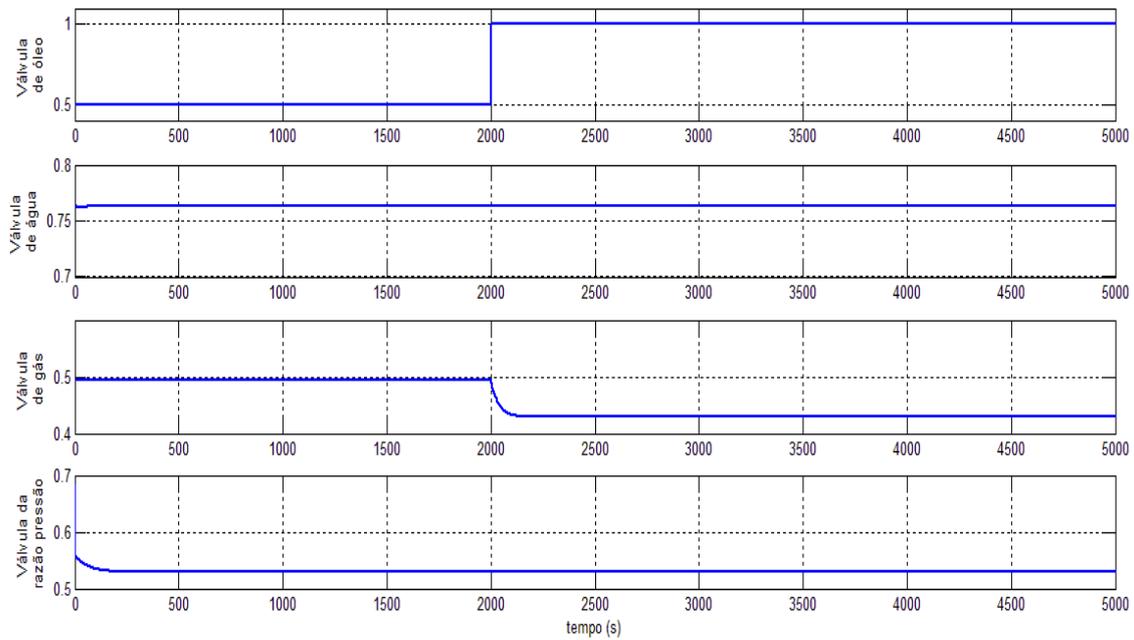
As falhas do sistema estão concentradas nas falhas das válvulas, podendo estas ficarem presas em qualquer posição da sua faixa de abertura. Quando a válvula prende, há uma perda de efetividade do controle não havendo mais condições de manter o nível constante. Nesta situação, quando o fluxo de entrada for menor que o fluxo de saída, a falha vai ser indicada pela variável

“Falha VA” e quando o fluxo de entrada for maior que o fluxo de saída, a falha vai ser indicada pela variável “Falha VF”.

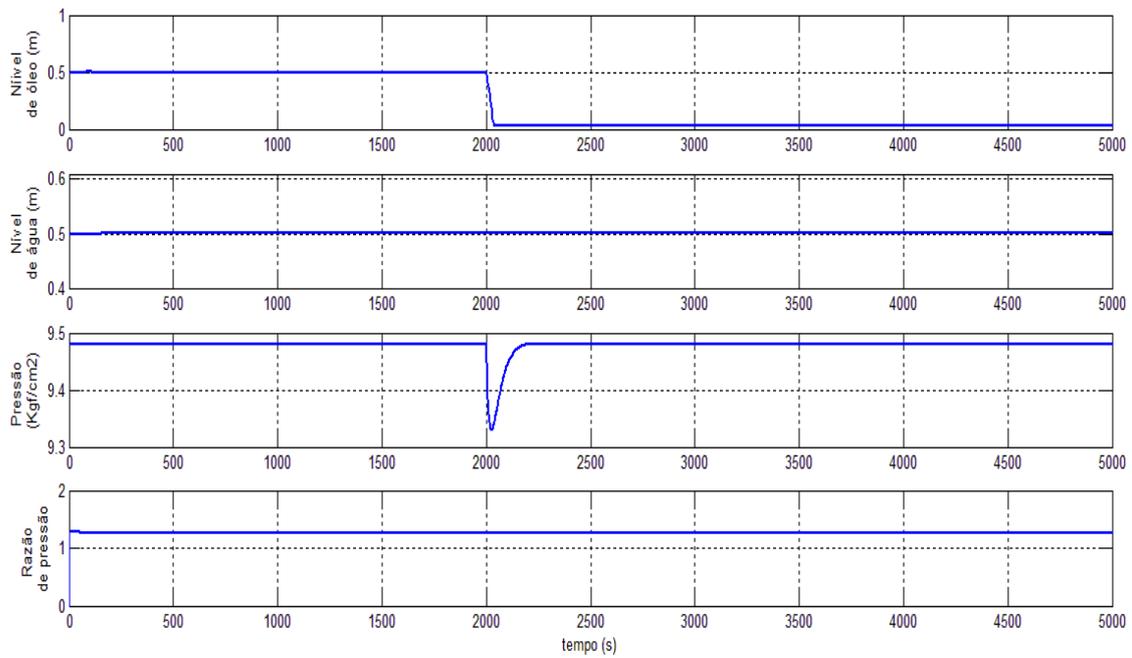
As primeiras simulações foram feitas com entrada constante, para melhor visualização do desempenho do diagnosticador. O fluxo multifásico de entrada manteve-se em  $0,0133 \text{ m}^3/\text{s}$  para a água,  $0,0167 \text{ m}^3/\text{s}$  para o óleo e  $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$  para o gás. A seguir são mostrados os resultados das simulações considerando o processo com alimentação constante. Foram feitos testes para falhas em cada variável manipulada de forma isolada, ocorrendo elas no tempo  $t = 2000 \text{ s}$ .

#### **5.4.1 - Falhas na válvula de óleo**

O primeiro teste foi feito assumindo uma situação em que a válvula fica presa com 100% de abertura como mostrada na figura 5.11a. A partir desta situação, observa-se na figura 5.11b que o nível de óleo cai bruscamente influenciando diretamente na queda de pressão no vaso separador, o que é rapidamente corrigido pelo controlador fechando a válvula de gás. O diagnosticador indica uma “Falha VA” na válvula de óleo, 10 s após a ocorrência da falha (figura 5.12a). Como pode ser visto nas figuras 5.12b, 5.12c e 5.12d, não há indicação de falha nas demais válvulas.

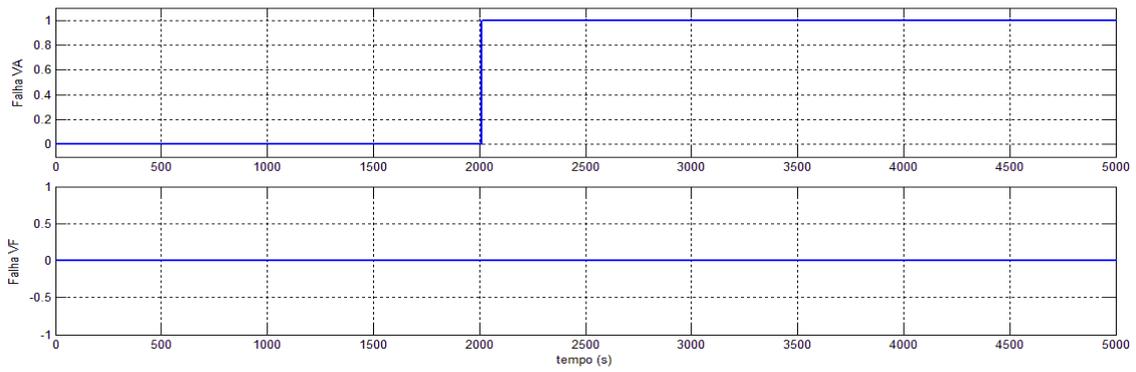


(a)

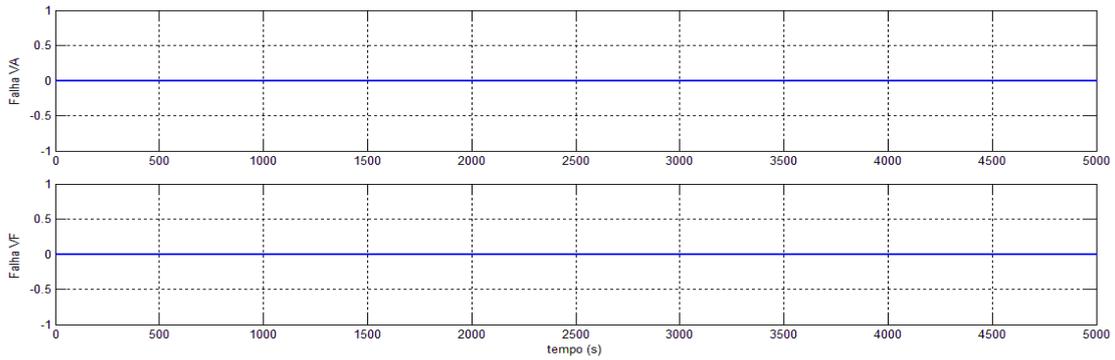


(b)

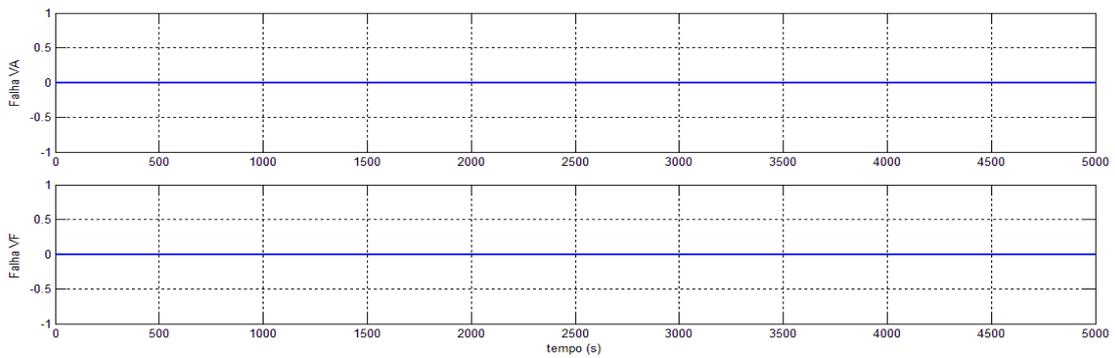
Figura 5.11: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



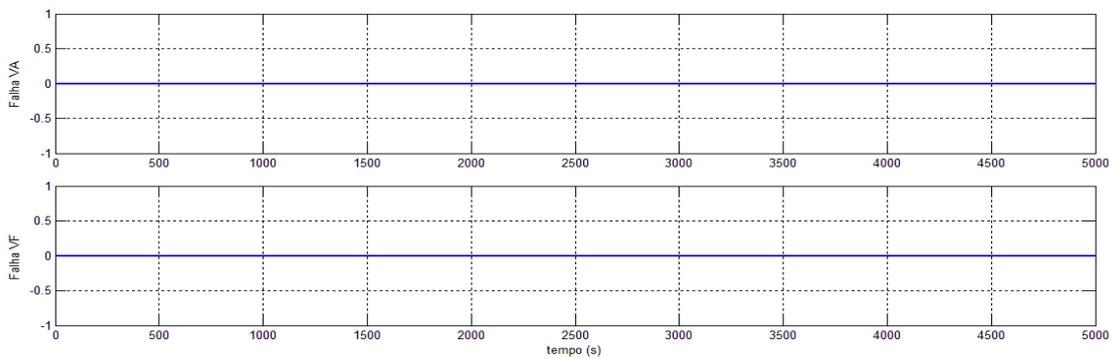
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.12: Resposta dos diagnosticadores de falha nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Outra situação testada com a válvula de óleo foi uma falha com abertura de 30%, como pode ser vista na figura 5.13a. Nesta situação, o fluxo de entrada de óleo é maior que o fluxo de saída, tendendo o nível de óleo a crescer de forma ininterrupta. Isto fará o sistema de segurança parar o processo quando o nível de óleo atinge a altura de 1,8 m (figura 5.13b), que é o diâmetro do vaso separador. Esta situação influencia o aumento da pressão no separador, que é corrigido pelo controlador abrindo a válvula de gás. Da figura 5.14a pode-se apreciar que o diagnosticador indicou uma “Falha VF” 30 s depois da ocorrência da anormalidade, tempo bastante antes do sistema de segurança atuar. A detecção da falha foi um pouco mais lenta do que no primeiro teste, porém em um número finito de passos conforme exigido pela definição de diagnose de falhas por SEDs, isso devido aos sintomas causados pela falha terem surgidos mais tardiamente que no primeiro teste. Observa-se que o diagnosticador indicou a falha com cerca de 4 min antes de o sistema segurança entrar em ação desligando o processo, mostrando que o operador terá tempo suficiente para tomar as providências corretivas antes de o processo parar. Não há indicação de falha nas demais válvulas, como pode ser visto nas figuras 5.14b, 5.14c e 5.14d.

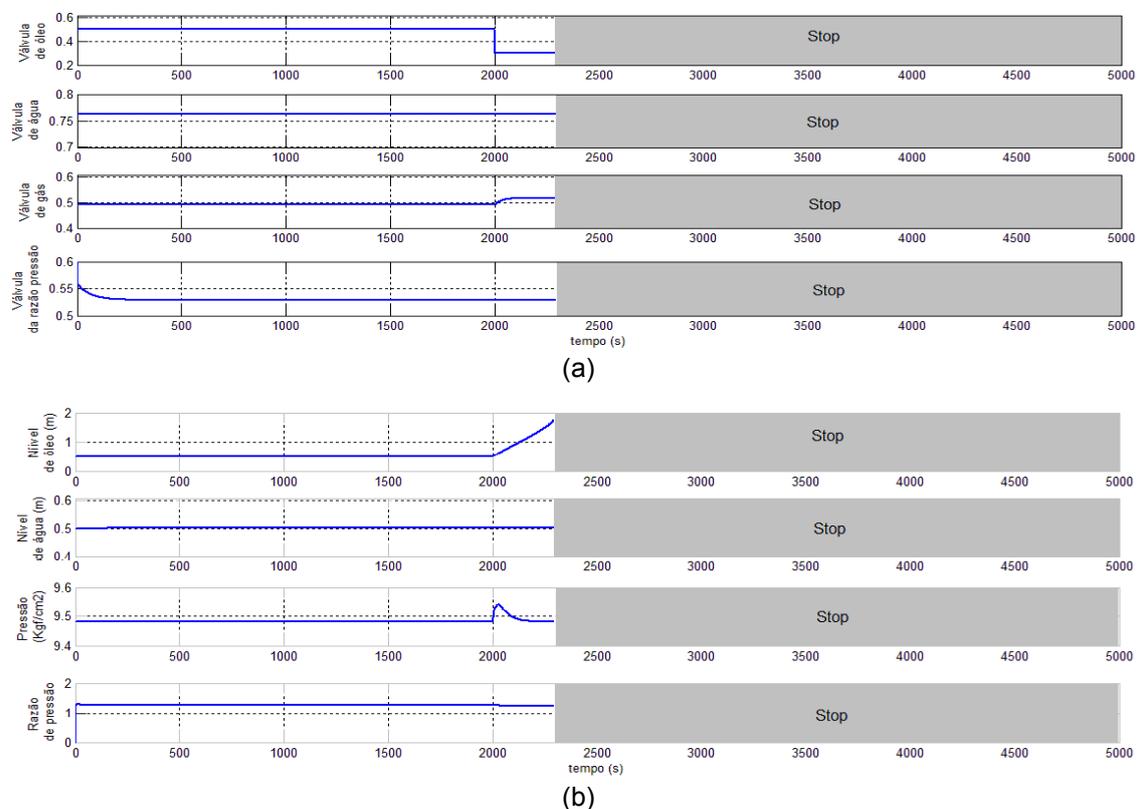
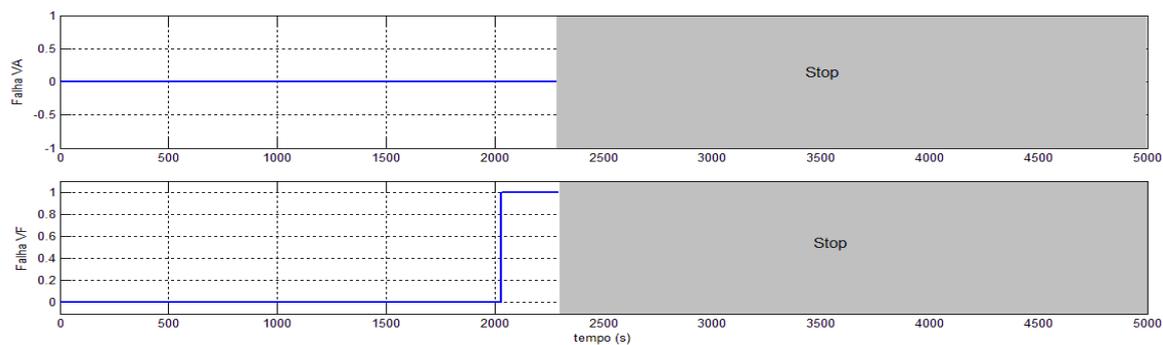
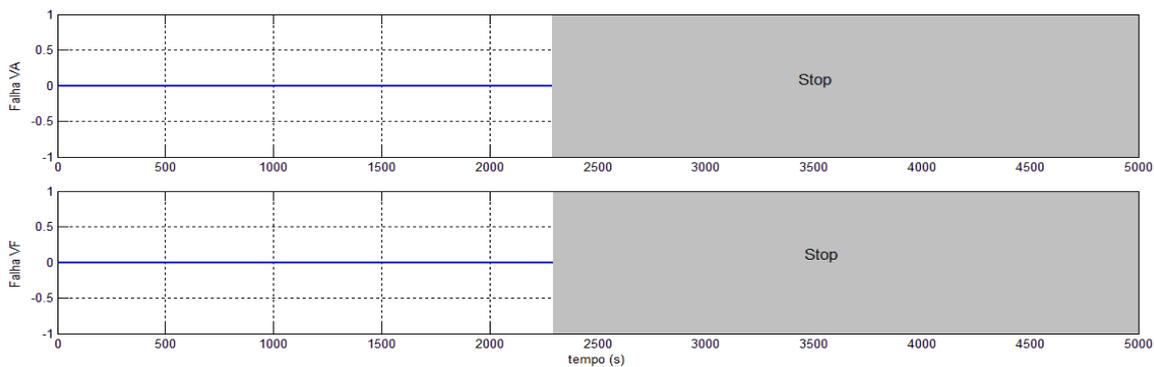


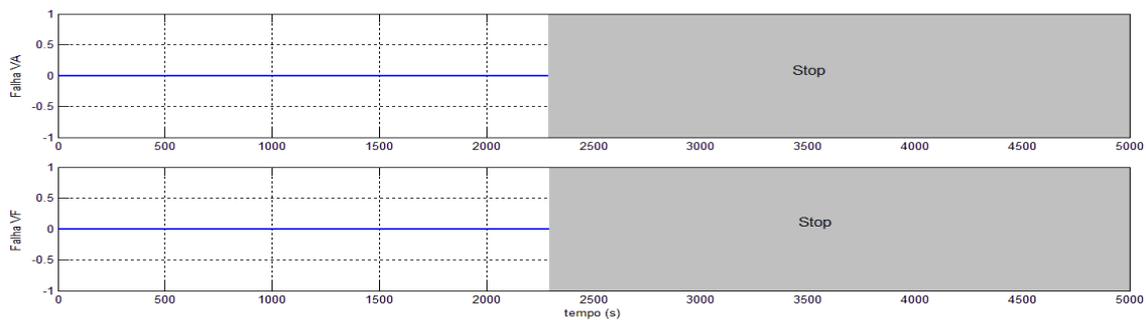
Figura 5.13: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



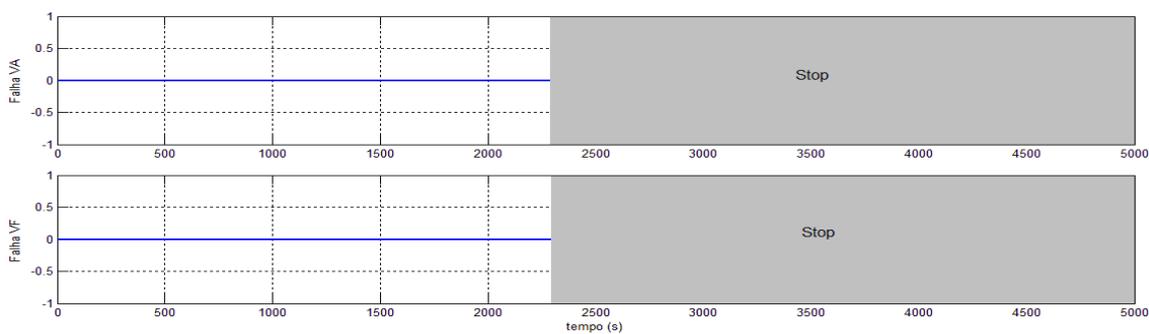
(a)



(b)



(c)

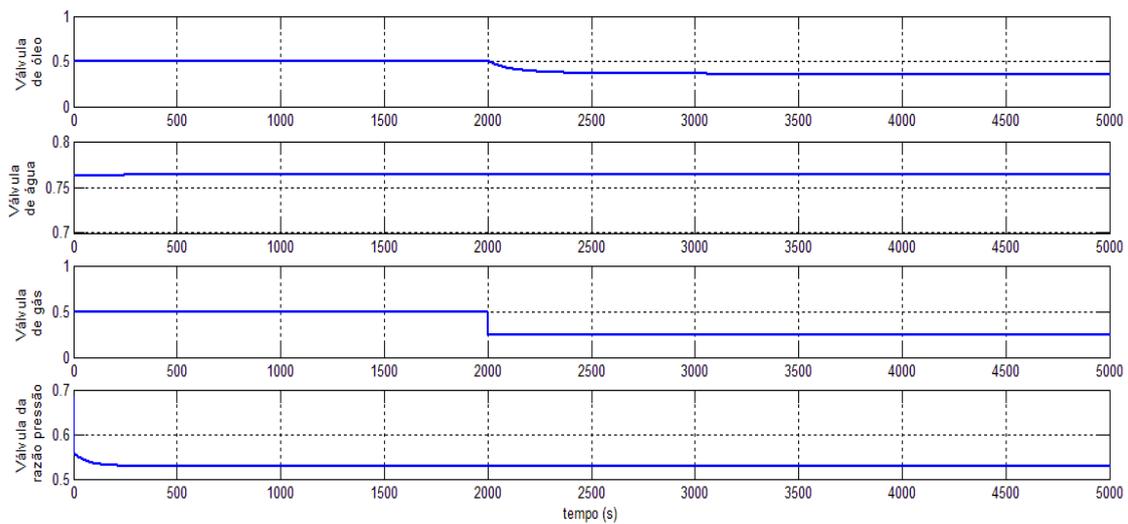


(d)

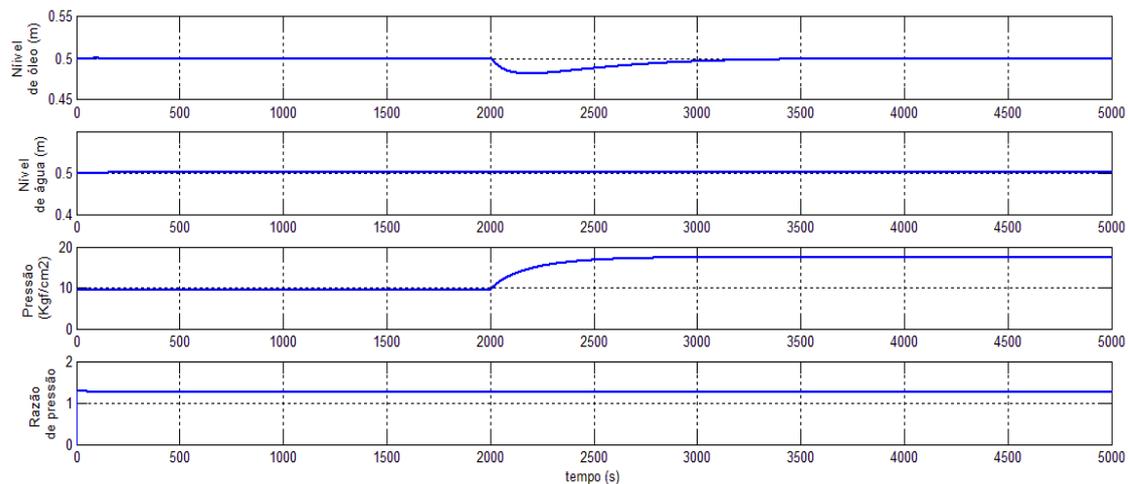
Figura 5.14: Respostas dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

## 5.4.2 - Falhas na válvula de gás

Neste caso foram testadas falhas na válvula de gás. Na primeira simulação considerou-se que a válvula ficou presa com abertura de 25% (figura 5.15a). Vê-se na figura 5.15b que esta situação provoca que a pressão do gás aumente influenciando no nível do óleo que diminui, fazendo o controlador atuar na válvula de óleo fechando-a. As outras variáveis controladas praticamente ficam estáveis. O diagnosticador indica “Falhas VF” 50 s depois da ocorrência da falha, conforme pode ser observado na figura 5.16b. O diagnosticador não indica falha nas demais válvulas, como pode ser visto nas figuras 5.16a, 5.16c e 5.16d.

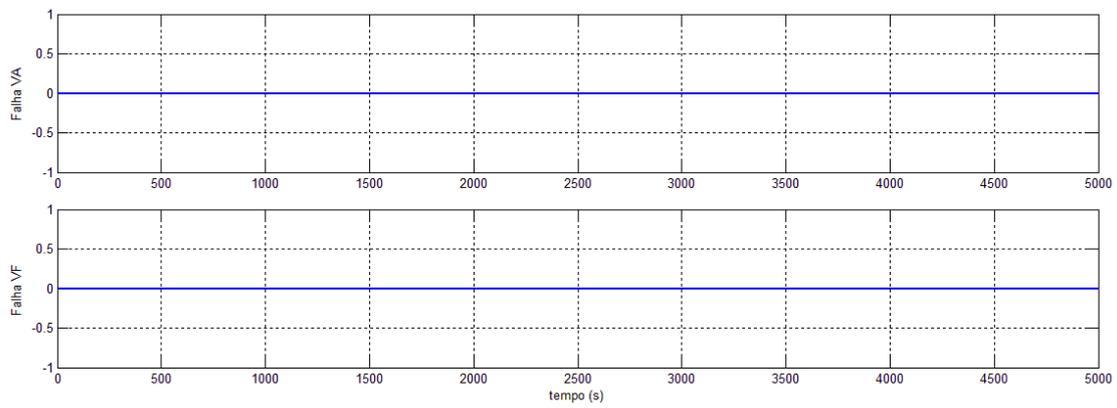


(a)

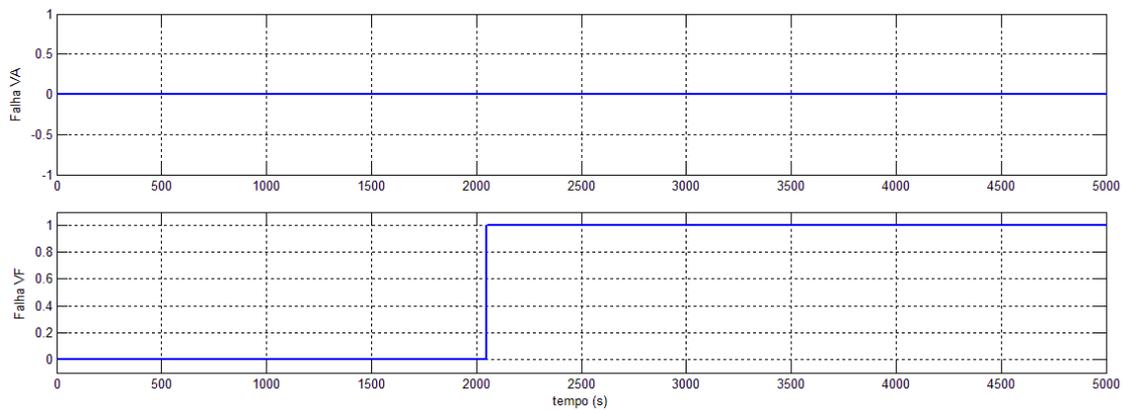


(b)

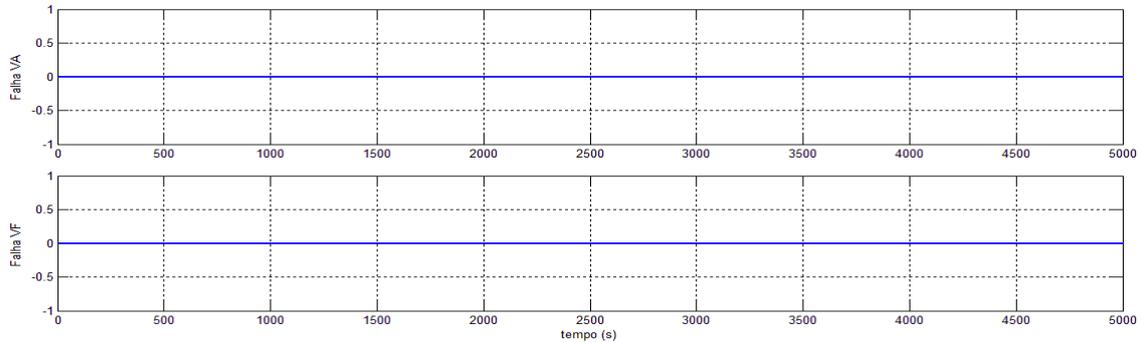
Figura 5.15: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



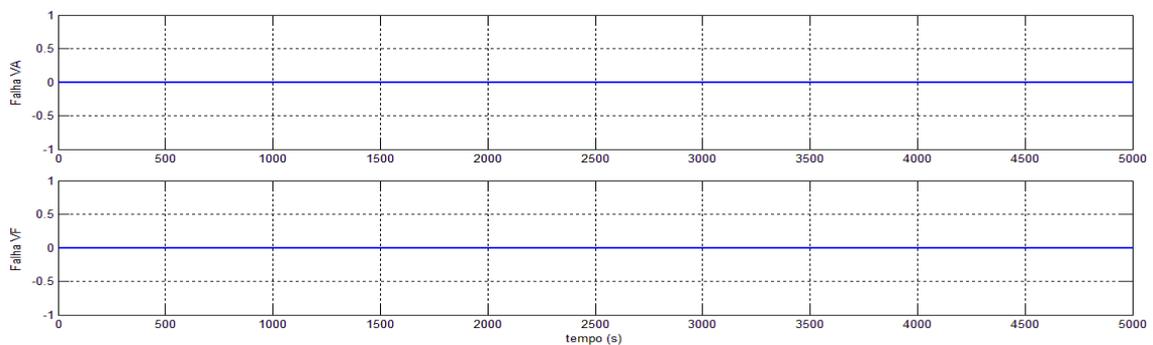
(a)



(b)



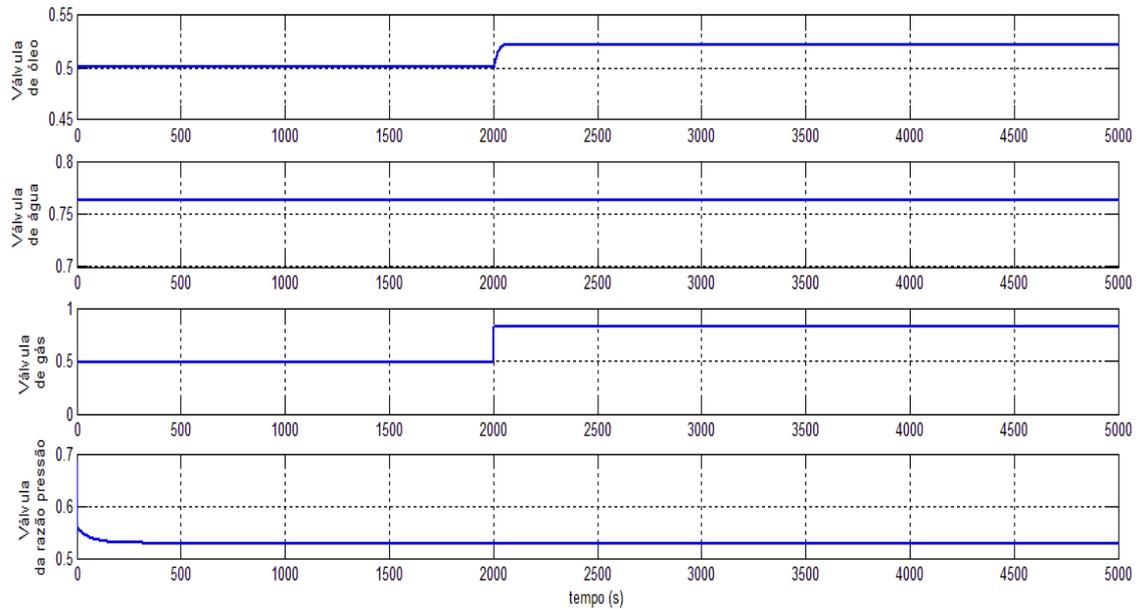
(c)



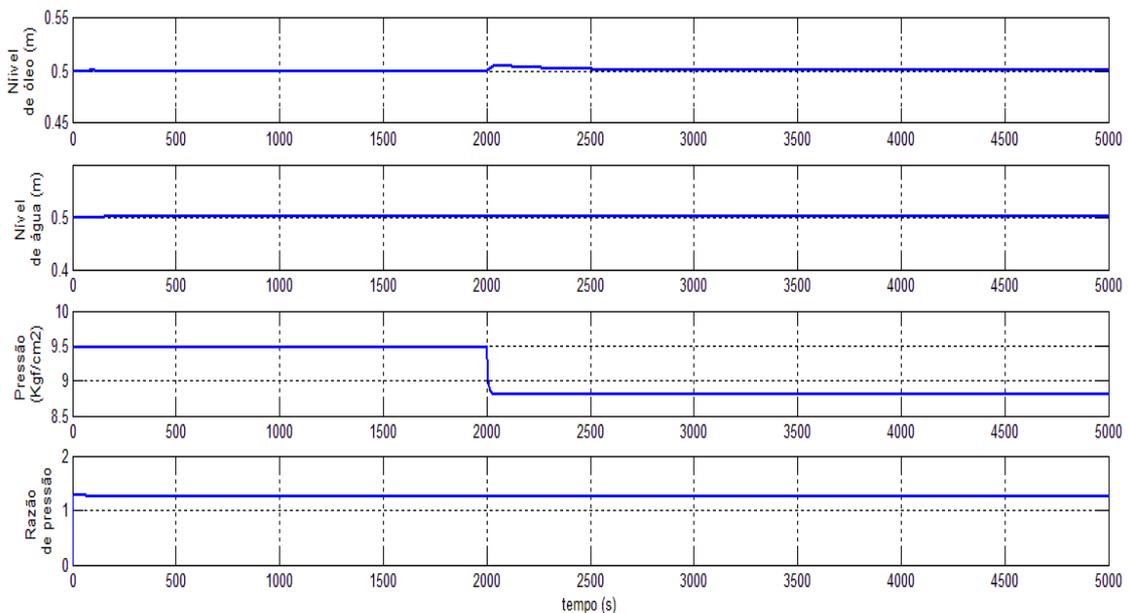
(d)

Figura 5.16: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Na segunda simulação considerou-se que a válvula de gás ficou presa com abertura de 83% (figura 5.17a). Conforme pode ser visualizado na figura 5.17b, esta situação tem como consequência uma queda da pressão no vaso encadeando uma pequena elevação do nível de óleo, a qual é controlada com uma maior abertura da válvula de óleo. O diagnosticador indicou “Falha VA” após 45 s da ocorrência da falha, como mostrado na figura 5.18b. As figuras 5.18a, 5.18c e 5.18d indicam que não há falhas nas outras válvulas.



(a)



(b)

Figura 5.17: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas

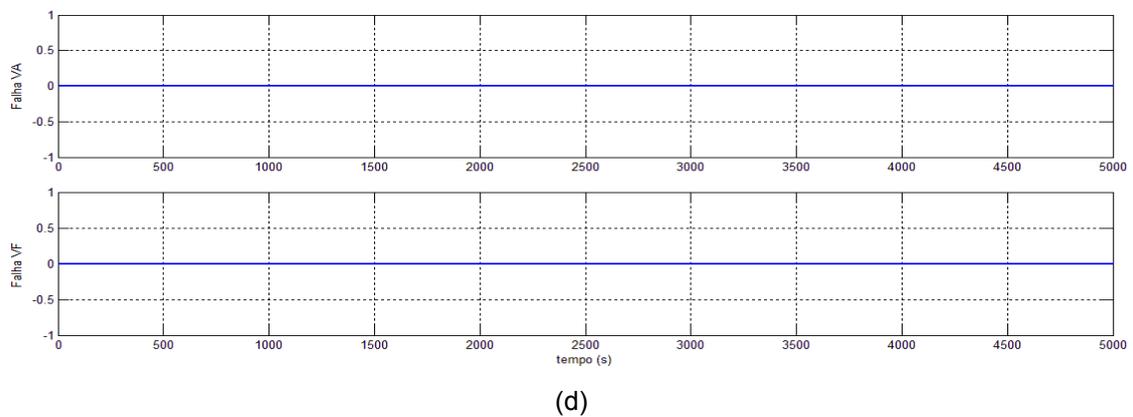
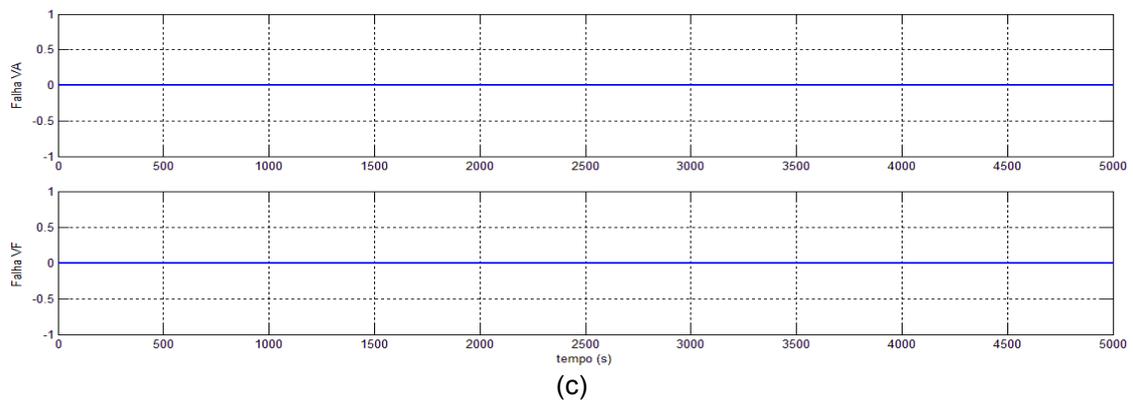
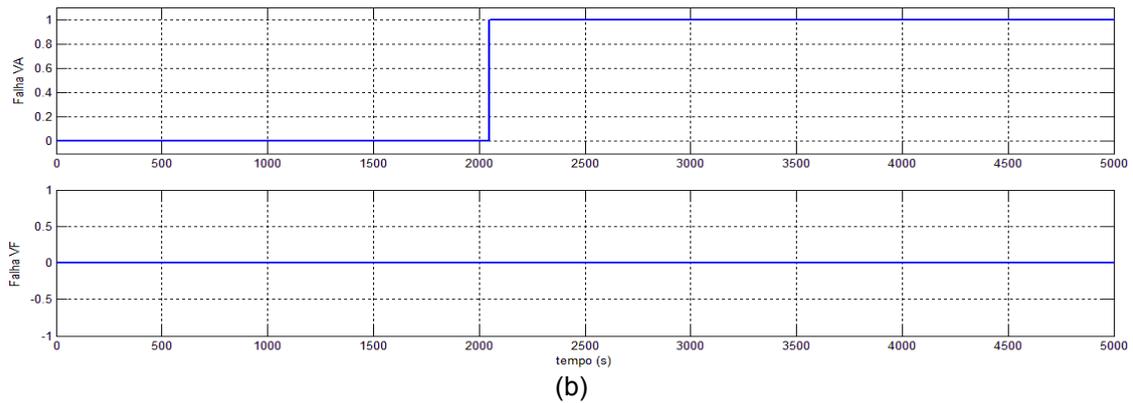
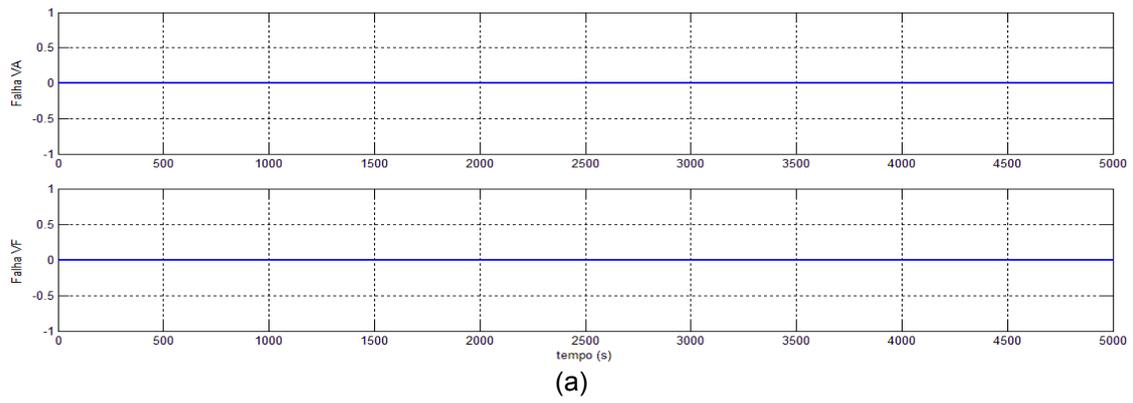
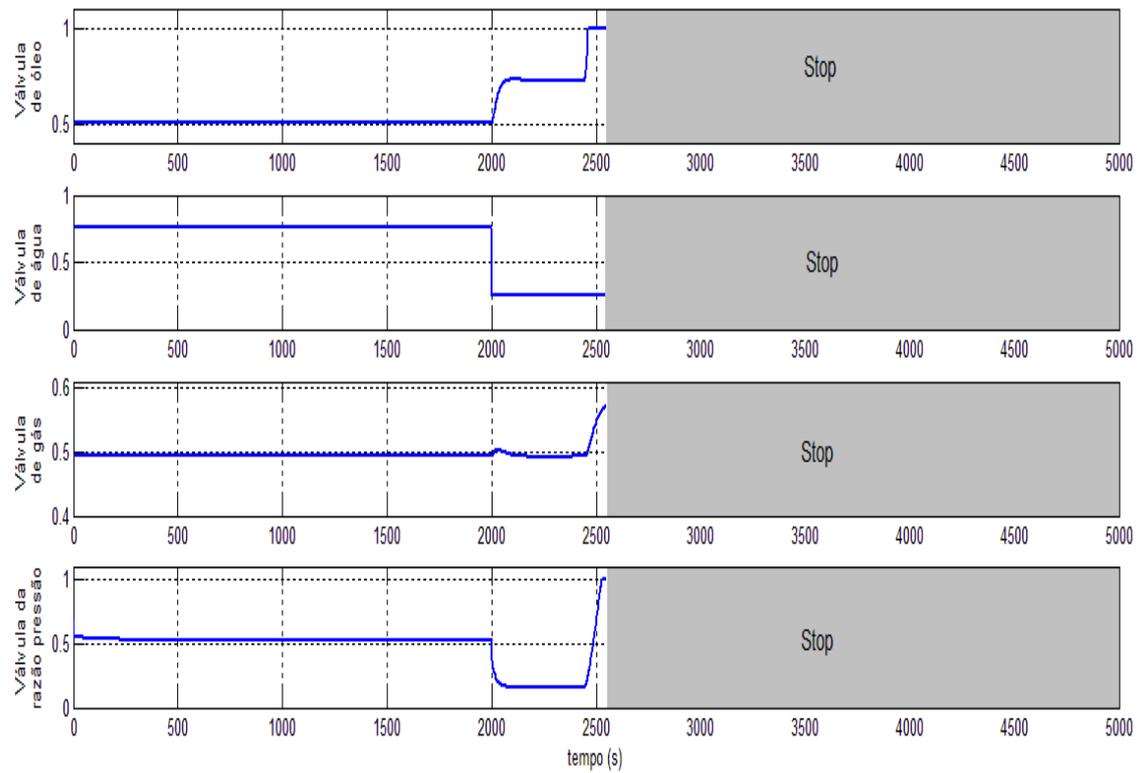


Figura 5.18: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

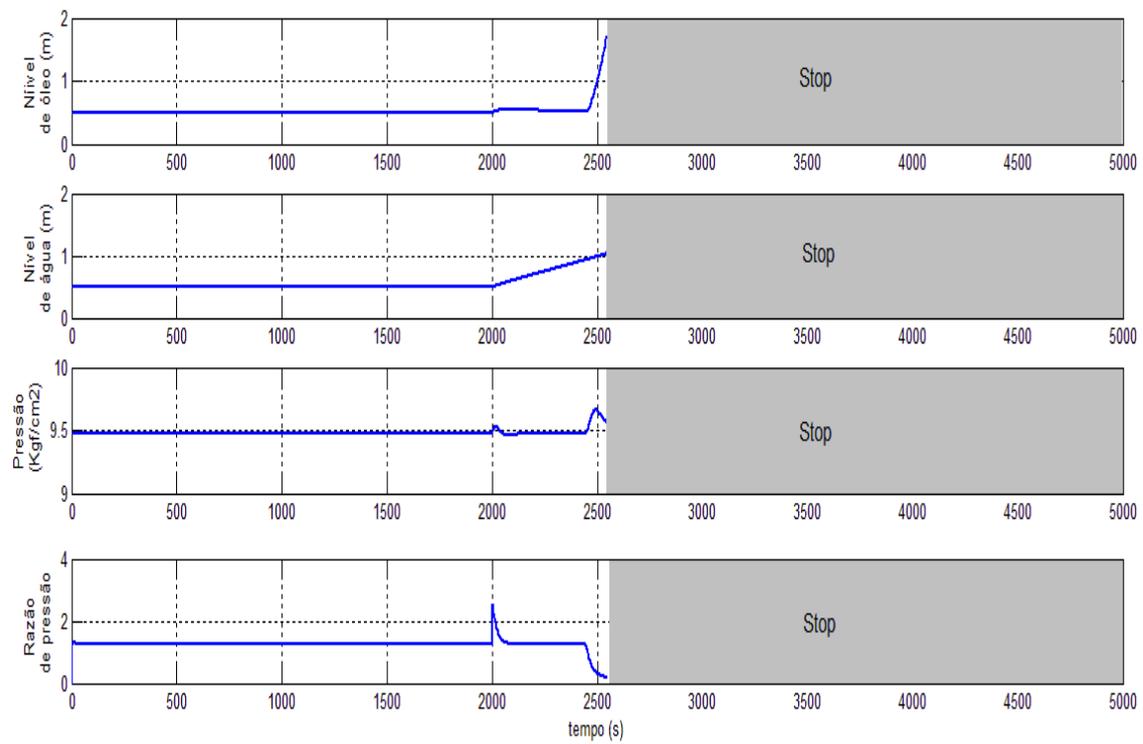
### 5.4.3 - Falhas na válvula de água

Foram realizadas duas simulações para testar falhas na válvula de água. Na primeira simulação considerou-se que a válvula ficou presa com abertura de 25% (ver figura 5.19a). A falha produz um aumento gradativo do nível da água, afetando as outras variáveis do processo as quais são bem controladas (figura 5.19b) pela manipulação das suas respectivas válvulas. A figura 5.20c indica “Falha VF” 10 s depois da ocorrência da anormalidade. Com o aumento gradativo do nível da água, aproximadamente no tempo  $t = 2450$  s esta ultrapassa a altura 0,8 m da chicane, invadindo a câmara de óleo e prejudicando a operação total do sistema de separação trifásica. A partir desse momento, o nível do líquido (água + óleo) na câmara de óleo sobe ininterruptamente, embora a válvula de óleo fique totalmente aberta, passando da altura da chicane. O sistema de segurança pára o processo assim que o nível do líquido, agora nível total, atinge a altura de 1,8 m (figura 5.19b) que é o diâmetro do vaso separador. A figura 5.20a mostra que o diagnosticador indica uma “Falha VF” na válvula de óleo momentos depois dela ficar totalmente aberta.

Em uma situação real, esta última situação deve nunca acontecer, pois o operador deve tomar as ações corretivas, inclusive parar o processo, assim que a primeira falha seja detectada.



(a)



(b)

Figura 5.19: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas

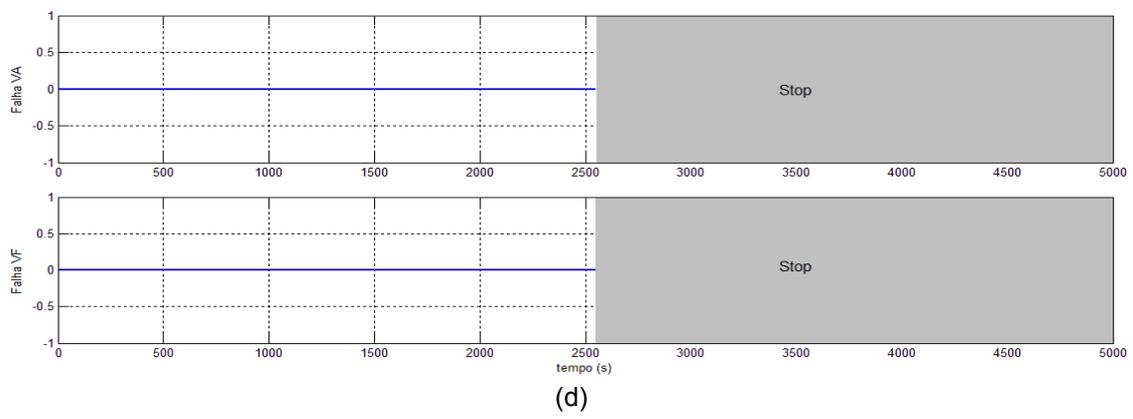
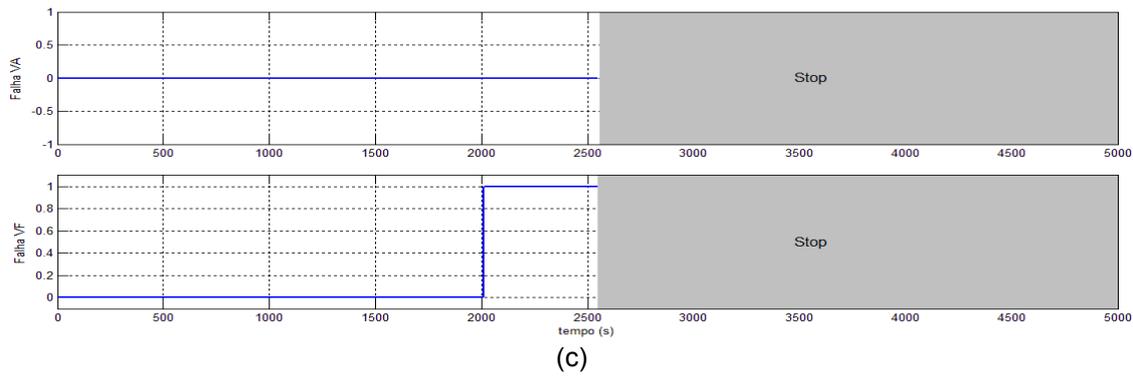
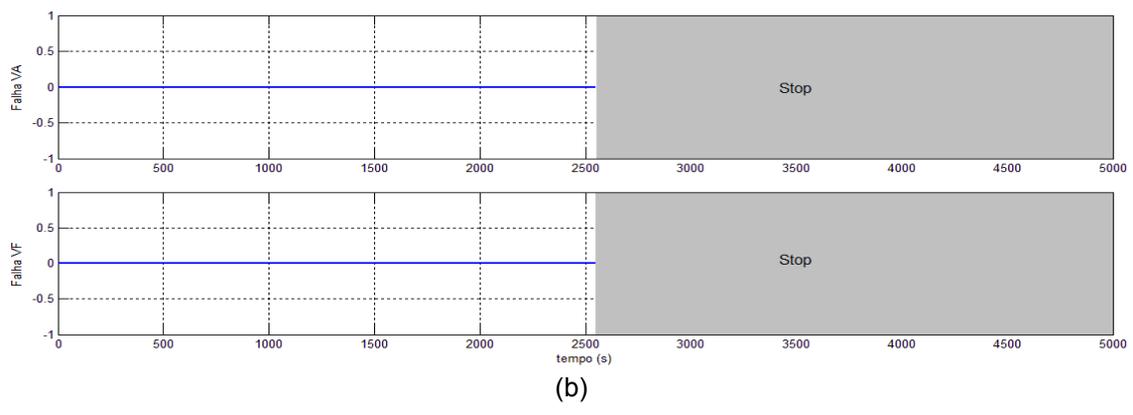
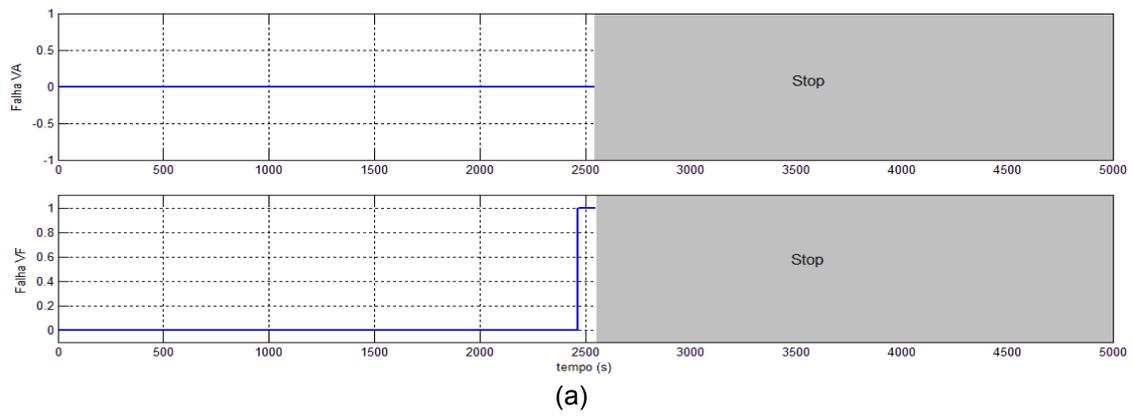
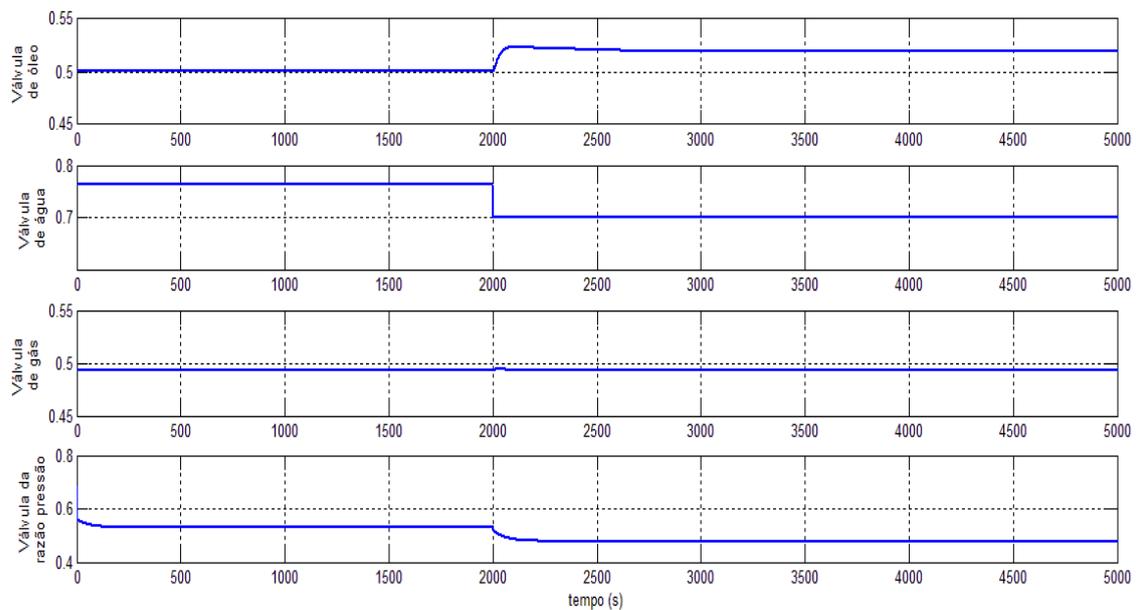
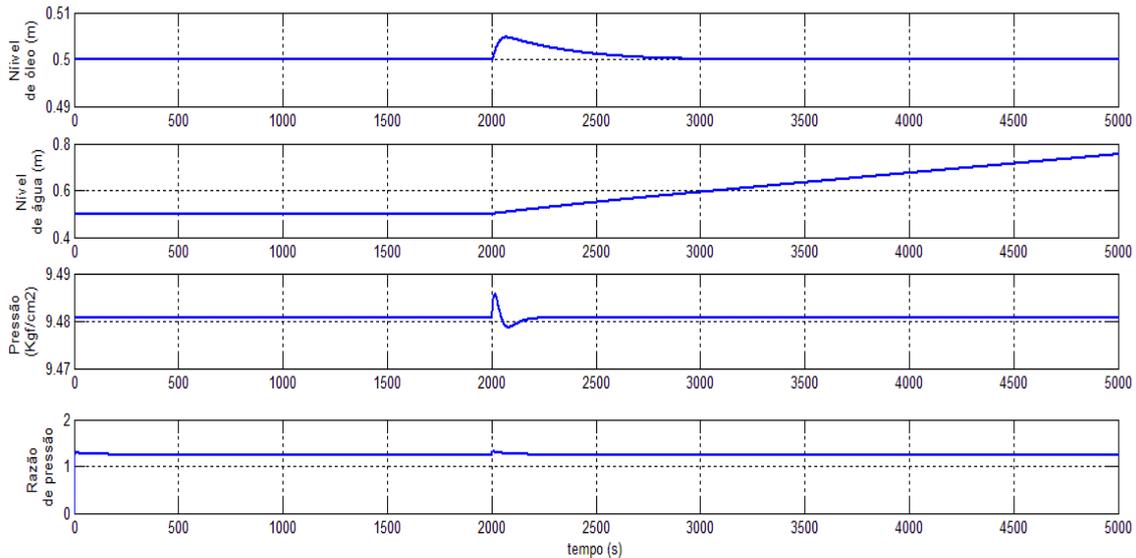


Figura 5.20: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Na segunda simulação foi considerada uma falha em que a válvula de água prende com 70% de abertura, como mostrado na figura 5.21a. Esta situação ocasiona um aumento lento do nível da água, fato que influencia sutilmente as outras variáveis do processo, as quais são mantidas controladas (veja figura 5.21b) pela manipulação das suas respectivas válvulas. A figura 5.22c mostra que o diagnosticador indica a “Falha VF” após 50 s da ocorrência da anomalia. O diagnosticador não indica falha nas demais válvulas, como visto nas figuras 5.22a, 5.11b e 5.22d.



(a)



(b)

Figura 5.21: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas

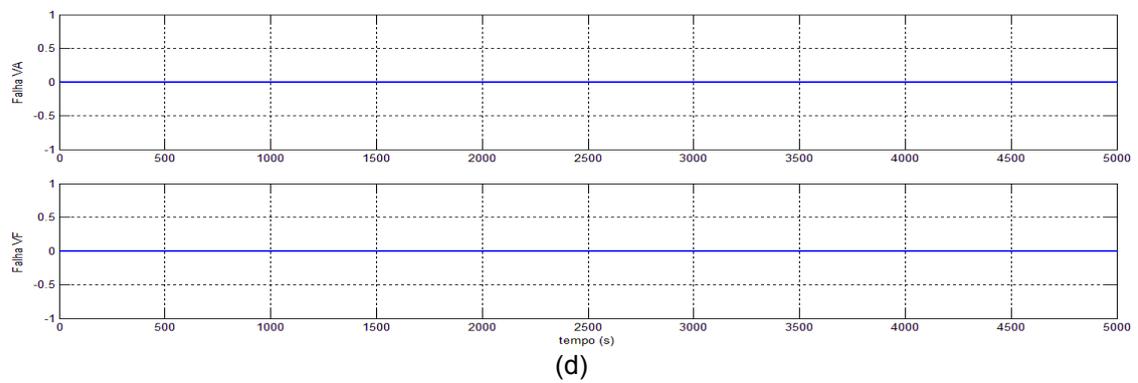
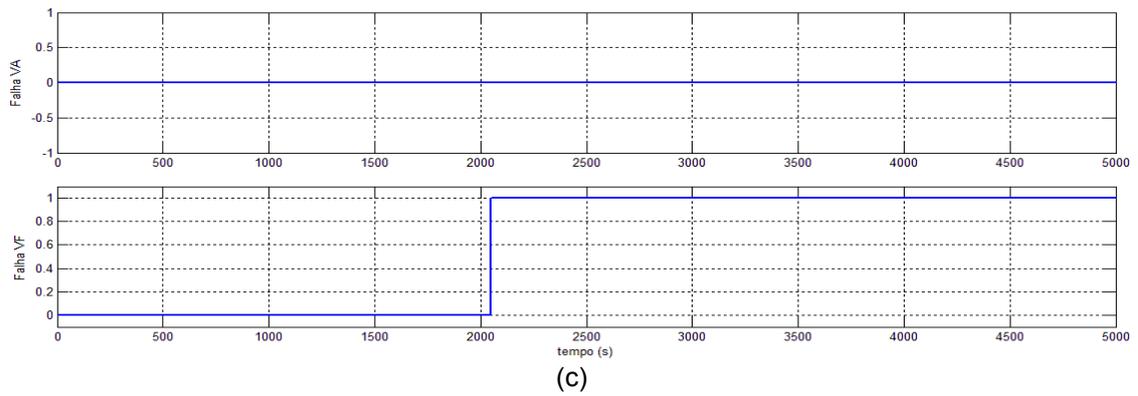
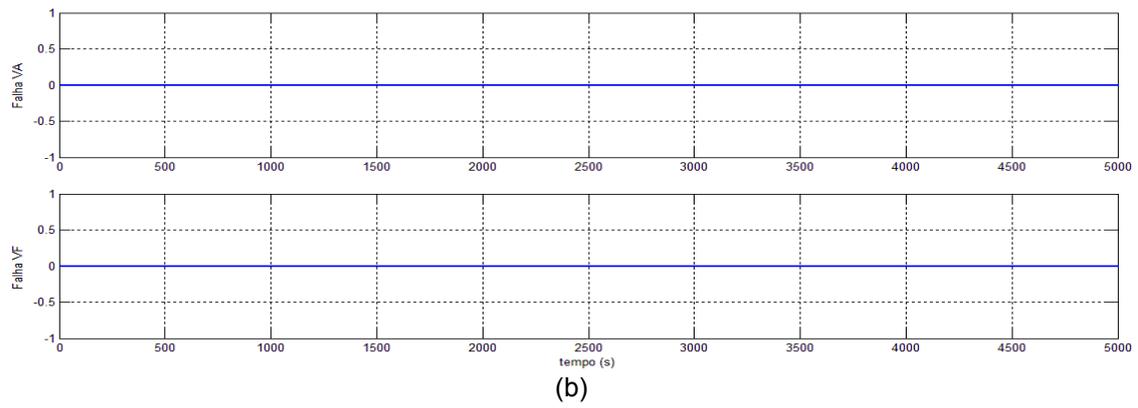
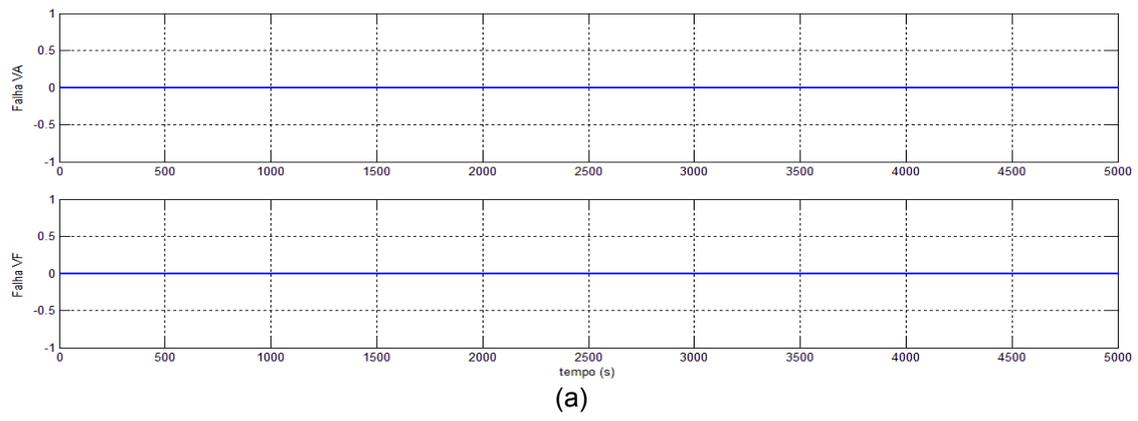
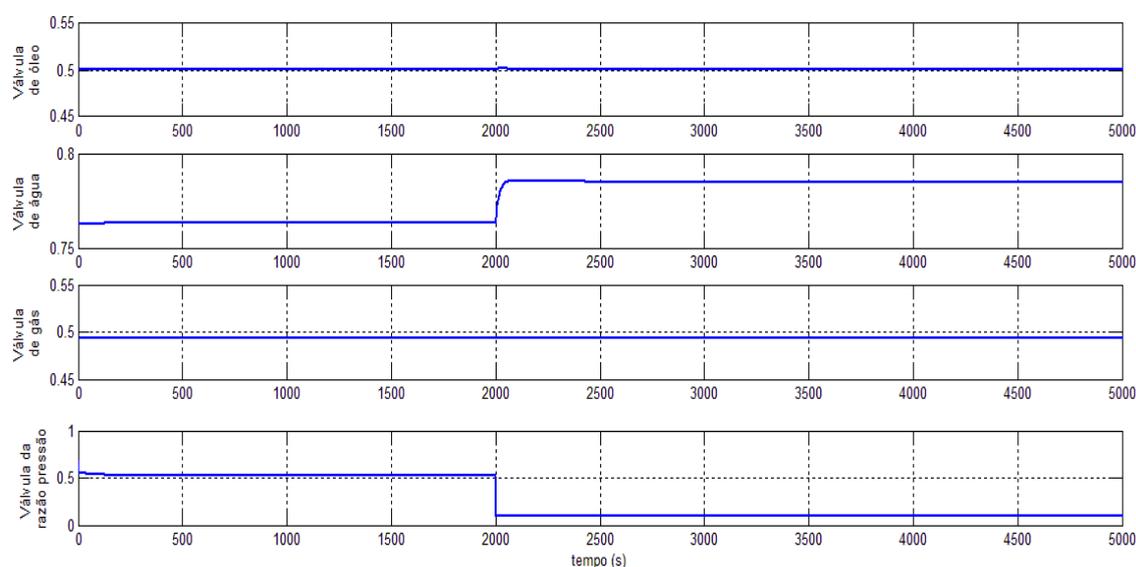


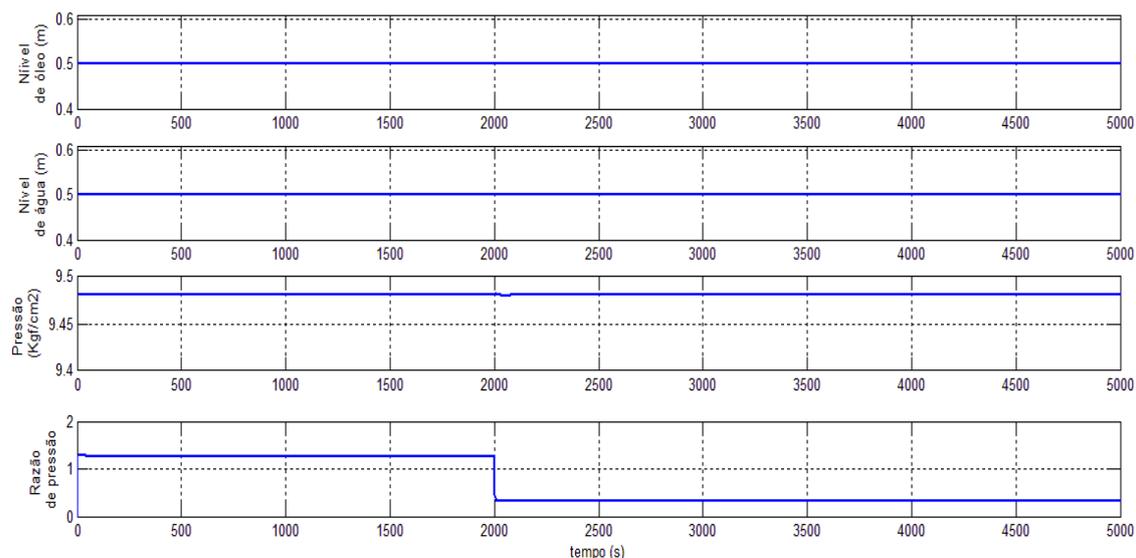
Figura 5.22: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

#### 5.4.4 - Falhas na válvula de razão de pressão

Foram feitas duas simulações para testar falhas na válvula de razão de pressão. Na primeira simulação, foi considerado válvula presa com abertura de 10% (figura 5.23a). Como pode ser visualizado na figura 5.23b, esta falha provoca mínimas variações nas demais variáveis controladas que são rapidamente corrigidas pelos controladores. Este fato é observado pelo diagnosticador que indica “Falha VF” na válvula de pressão após 35 s de acontecido o incidente (figura 5.24d), não havendo registro de anomalias nas demais válvulas, conforme indicado nas figuras 5.24a, 5.24b e 5.24c.

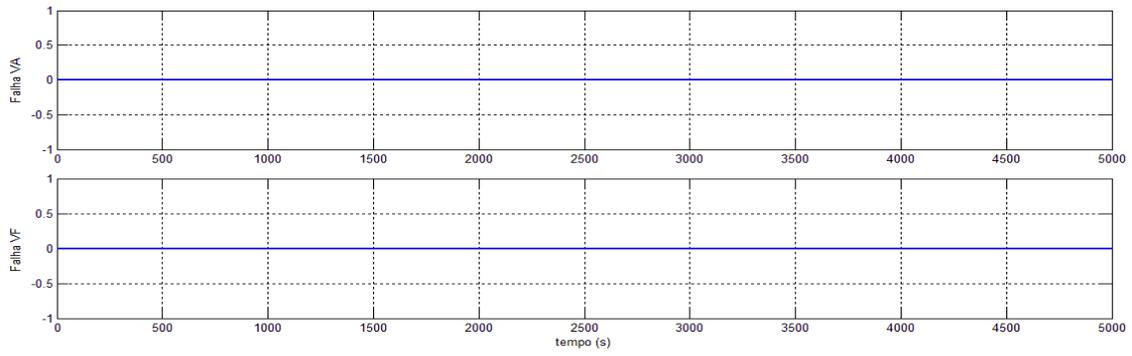


(a)

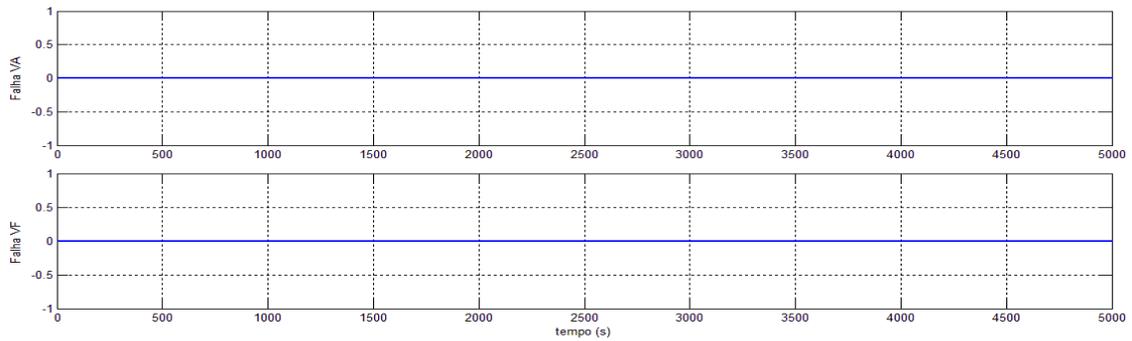


(b)

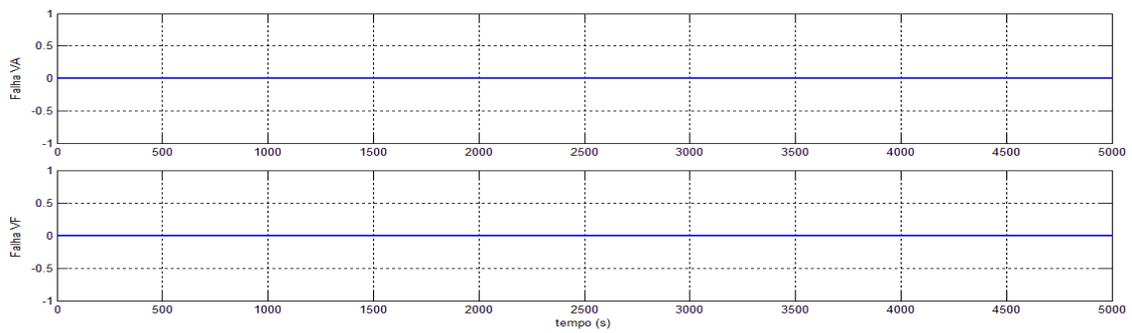
Figura 5.23: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



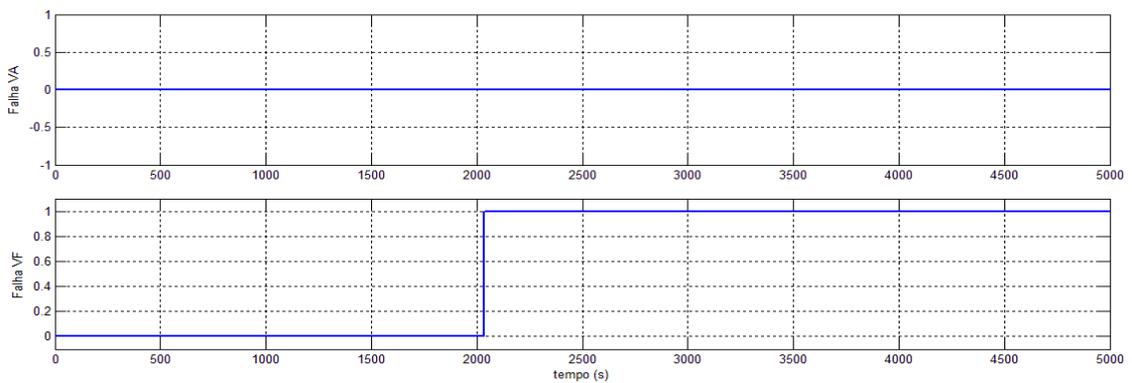
(a)



(b)



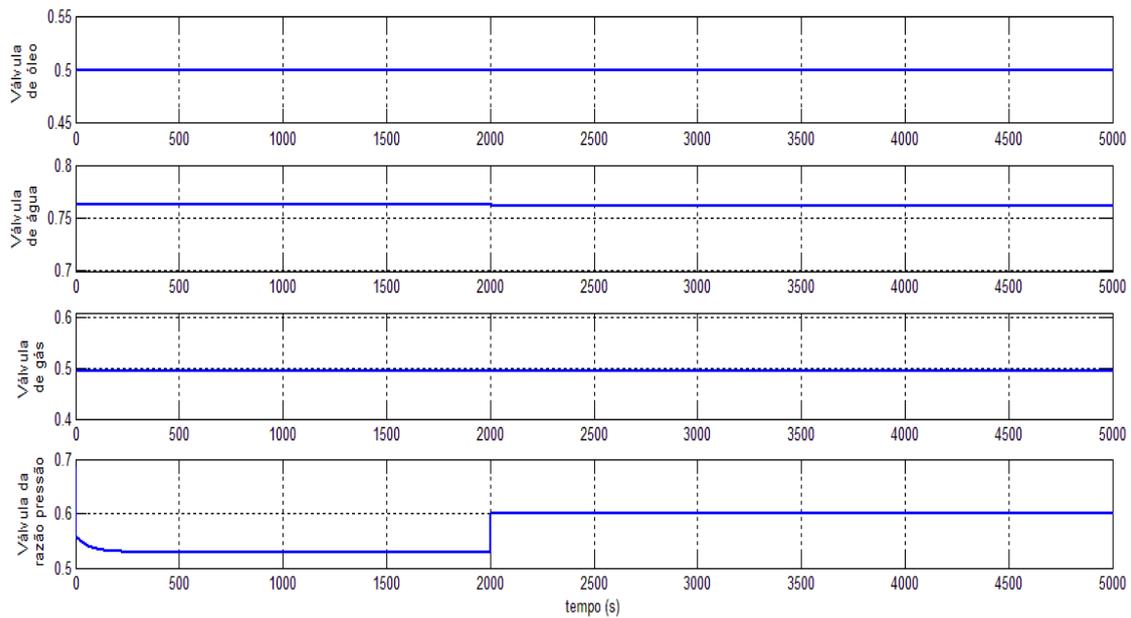
(c)



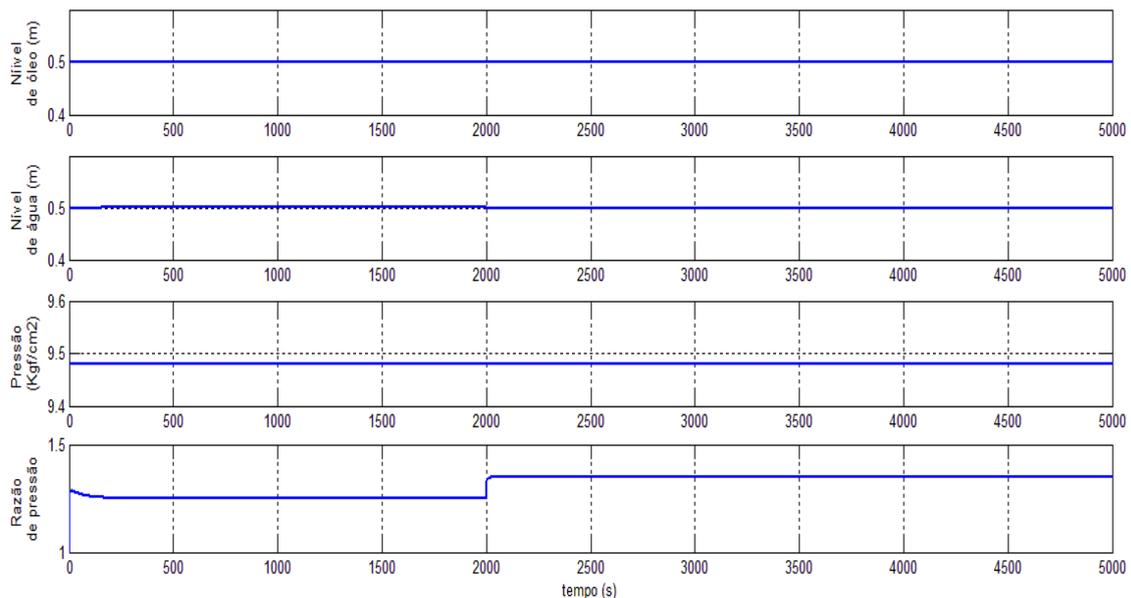
(d)

Figura 5.24: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

No segundo caso, simulou-se que a válvula ficou presa na abertura de 60%, conforme apresentado na figura 5.25a. A partir desse instante, pode ser observada uma mudança sutil somente na variável da razão de pressão, ficando as outras variáveis praticamente constantes (ver figura 5.25b). Apesar da pouca variação no sistema, o diagnosticador indicou “Falha VA” na válvula de razão de pressão 20 s depois da ocorrência da falha, conforme mostrado na figura 5.26d. Como esperado, diagnosticador não indica nenhum mau funcionamento das outras válvulas (figuras 5.26a, 5.26b e 5.26c).

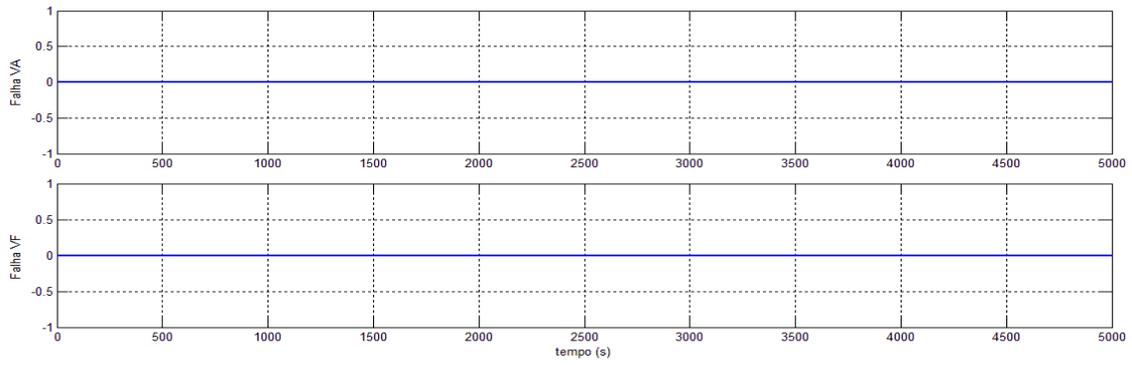


(a)

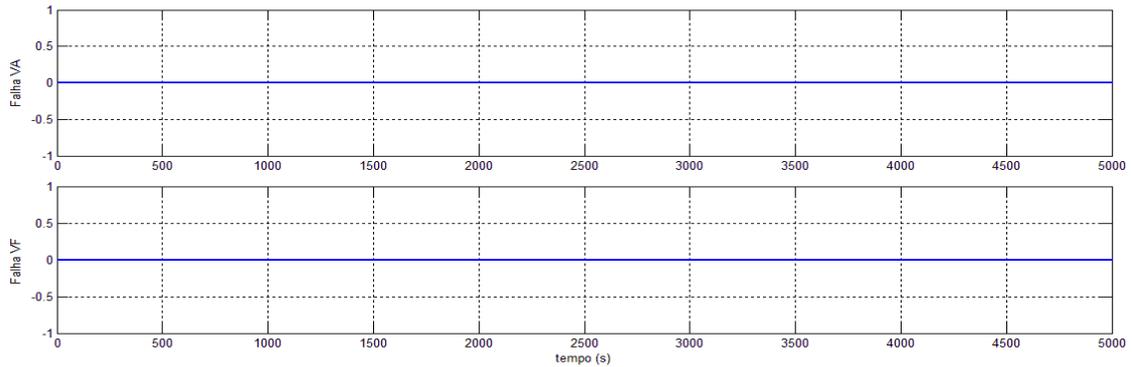


(b)

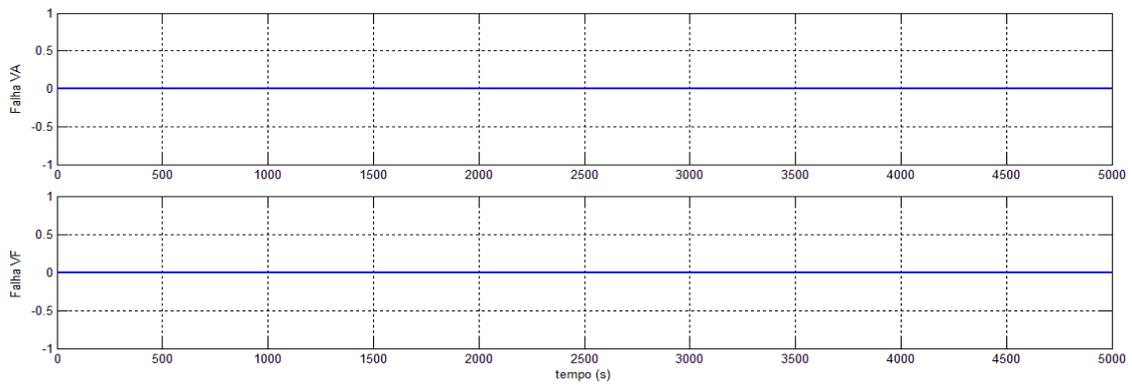
Figura 5.25: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



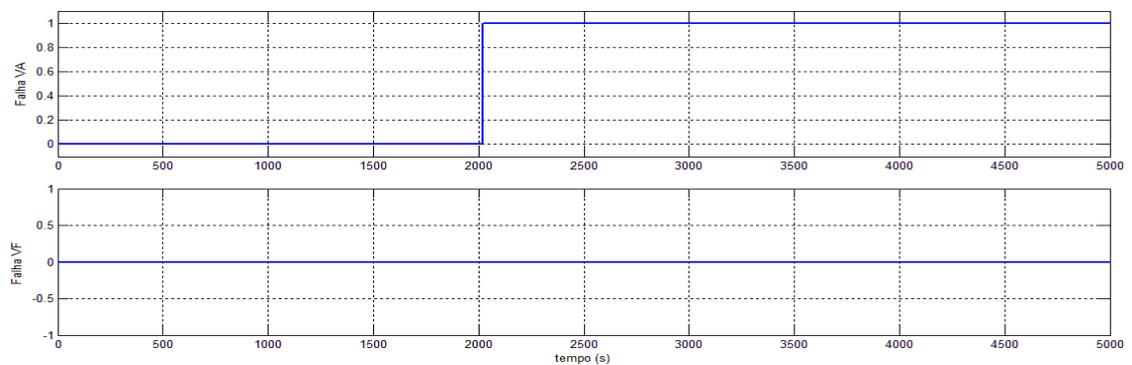
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.26: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

### 5.4.5- Processo com fluxo de alimentação em padrão golfadas

As golfadas são flutuações na corrente de alimentação que produzem oscilações na pressões e nas vazões do processo, as quais podem causar severos problemas na operação da plataforma de produção (Azevedo Jr. e Sotomayor, 2010): (i) dificuldade de separação da água e do óleo, comprometendo o desempenho de equipamentos à jusante como tratadores de óleo e desidratadores, e (ii) possível parada de emergência da plataforma por nível muito alto dos vasos separadores.

Neste trabalho, considera-se que o escoamento de alimentação em padrão de golfadas tem o perfil apresentado na figura 5.27. Estas golfadas correspondem a uma variação de mais ou menos 20% em relação ao fluxo de carga constante das simulações anteriores. As figuras 5.28 e 5.29 ilustram o comportamento das variáveis manipuladas e variáveis controladas do processo sob estas perturbações na entrada.

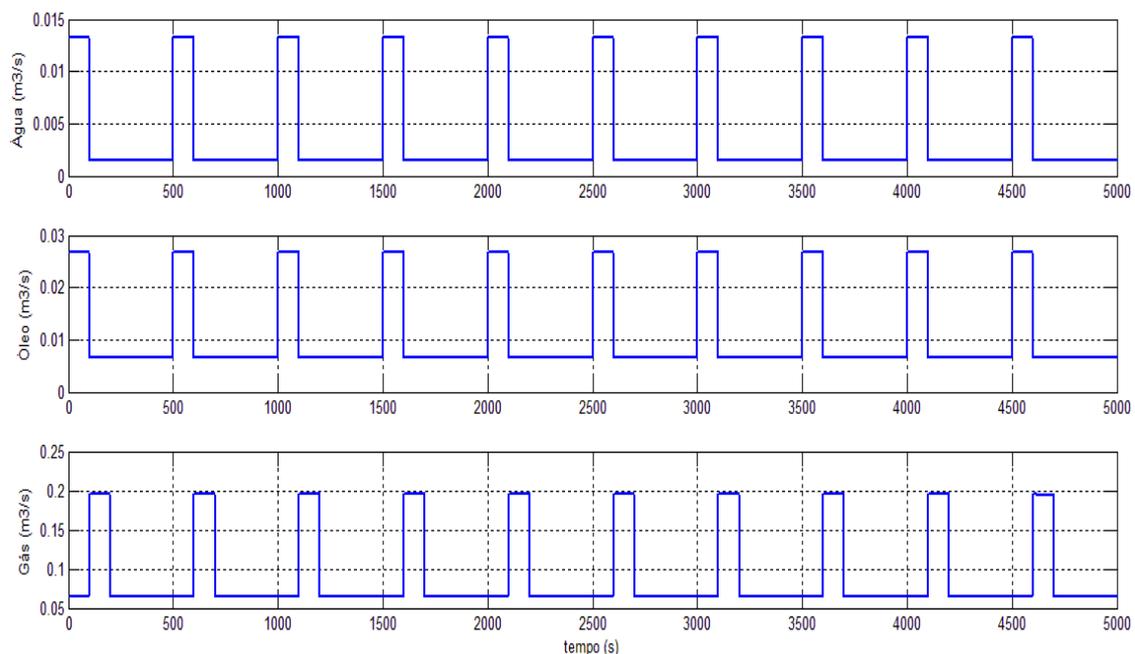


Figura 5.27: Escoamento de alimentação em padrão de golfadas

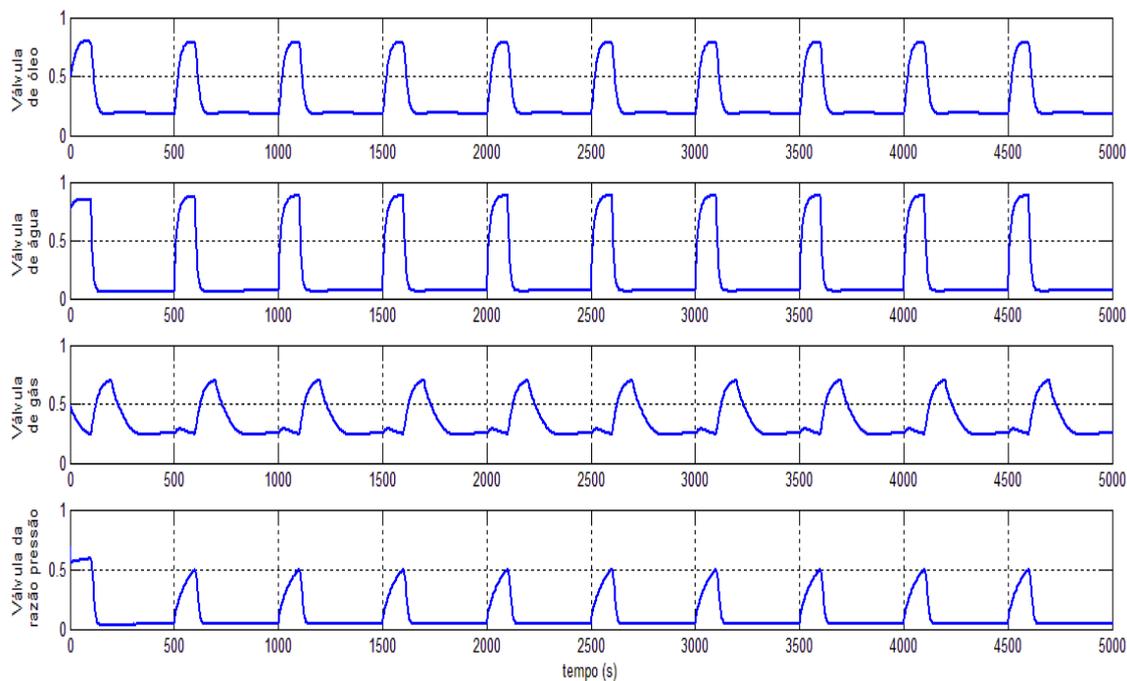


Figura 5.28: Variáveis manipuladas

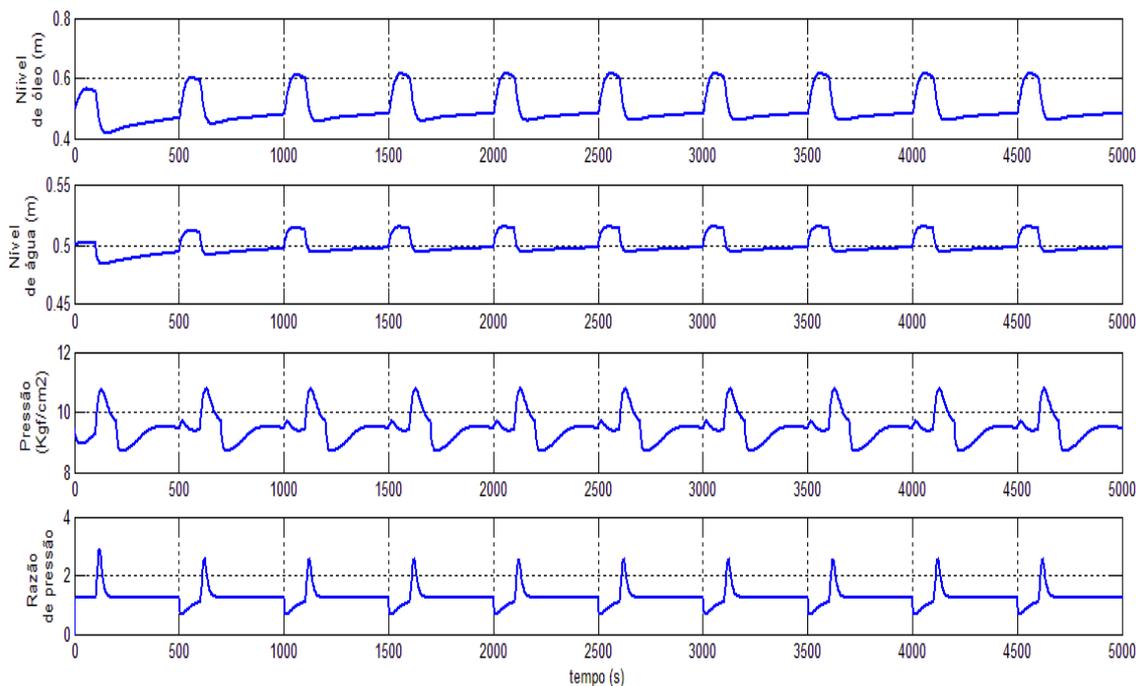
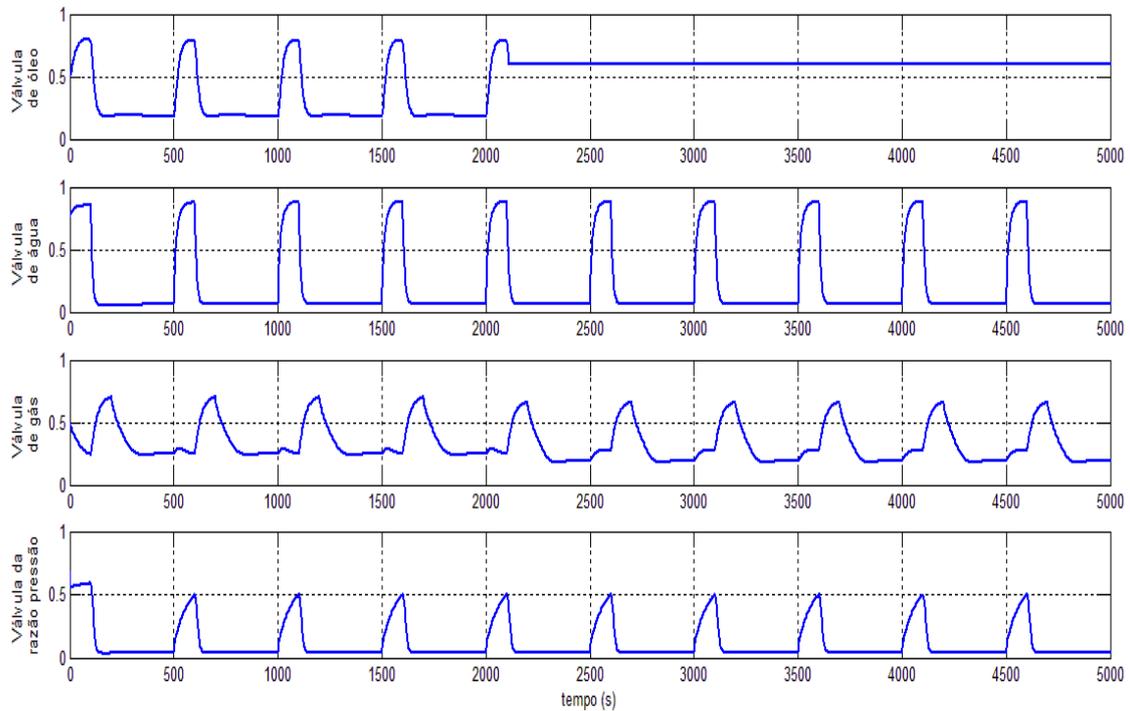


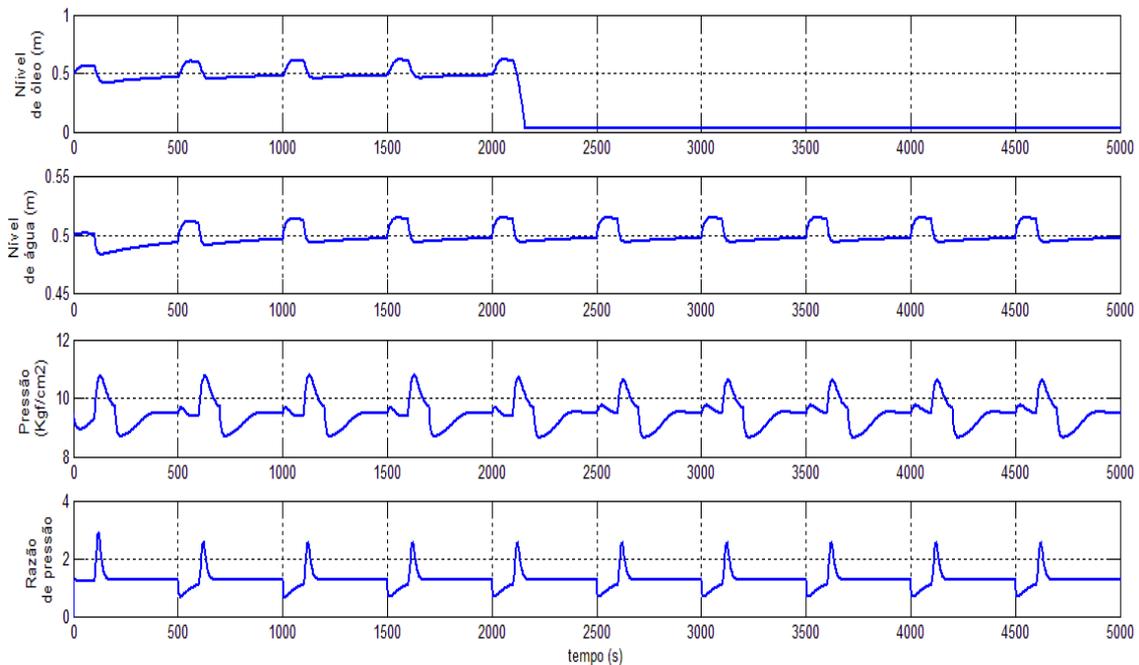
Figura 5.29: Variáveis controladas

Nesta situação de operação do processo sob golfadas, considerou-se a ocorrência de um mal funcionamento da válvula de óleo, ficando esta presa com uma abertura de 60% no instante  $t = 2110$  s, como ilustrado na figura 5.30a. A figura 5.30b mostra que a falha quase não influencia nas outras variáveis do processo. Após 20 s da ocorrência da falha, o diagnosticador indica “Falha VA”

na válvula de óleo, como visto na figura 5.31a. Já nas figuras 5.31b, 5.31c e 5.31d, o diagnosticador não manifesta a presença de falha nas outras válvulas. Observou-se que apesar de um fluxo de carga muito turbulento, o diagnosticador mostrou-se robusto, mantendo um desempenho muito bom semelhante à simulação com fluxo de carga constante.



(a)



(b)

Figura 5.30: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas

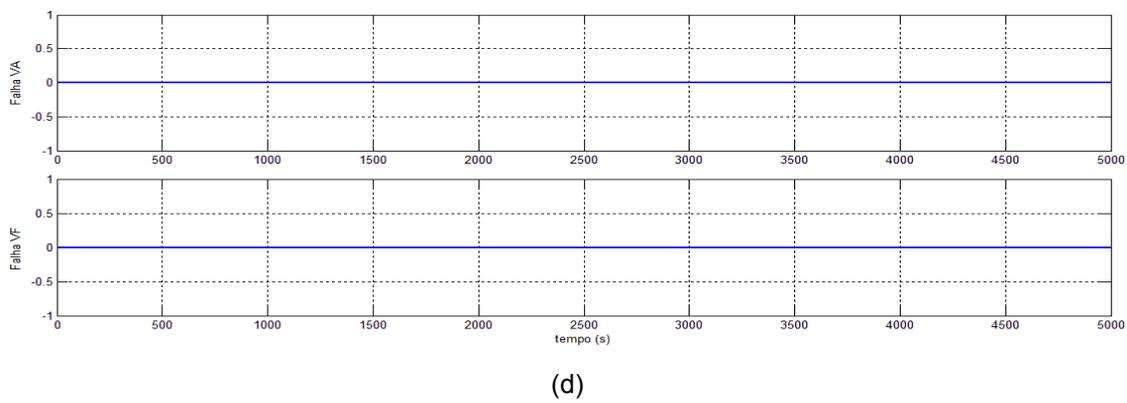
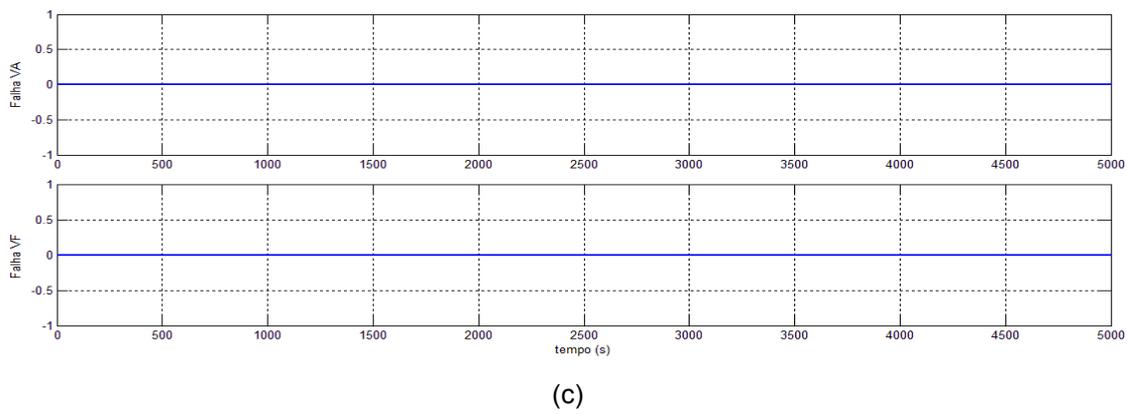
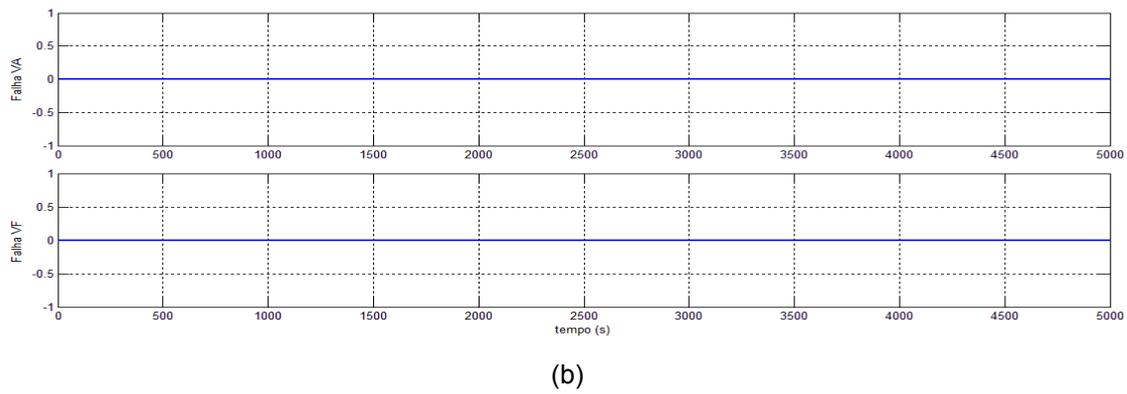
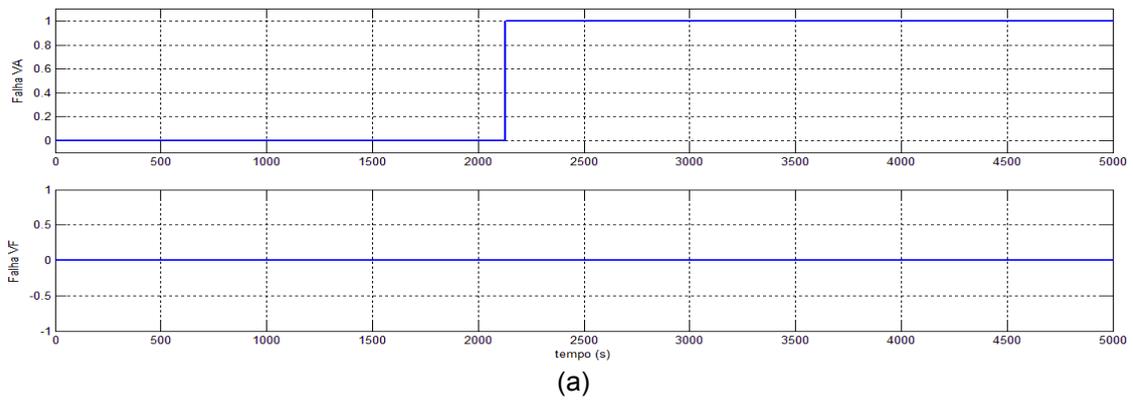


Figura 5.31: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Simula-se agora uma falha na válvula de gás ficando esta presa com abertura de 33% no instante  $t = 2604$  s (veja figura 5.32a). Da figura 5.32b, é possível observar que esta falha tem pouco efeito nas variáveis controladas, com exceção da pressão no vaso que ficou mais oscilatória. Nesta situação, o diagnosticador indica “Falha VF” na válvula de gás 41 s após da ocorrência da desta, conforme mostrado na figura 5.33b. Como pode se visto nas figuras 5.33a, 5.33c e 5.33d, o diagnosticador não indica mais nenhuma outra falha.

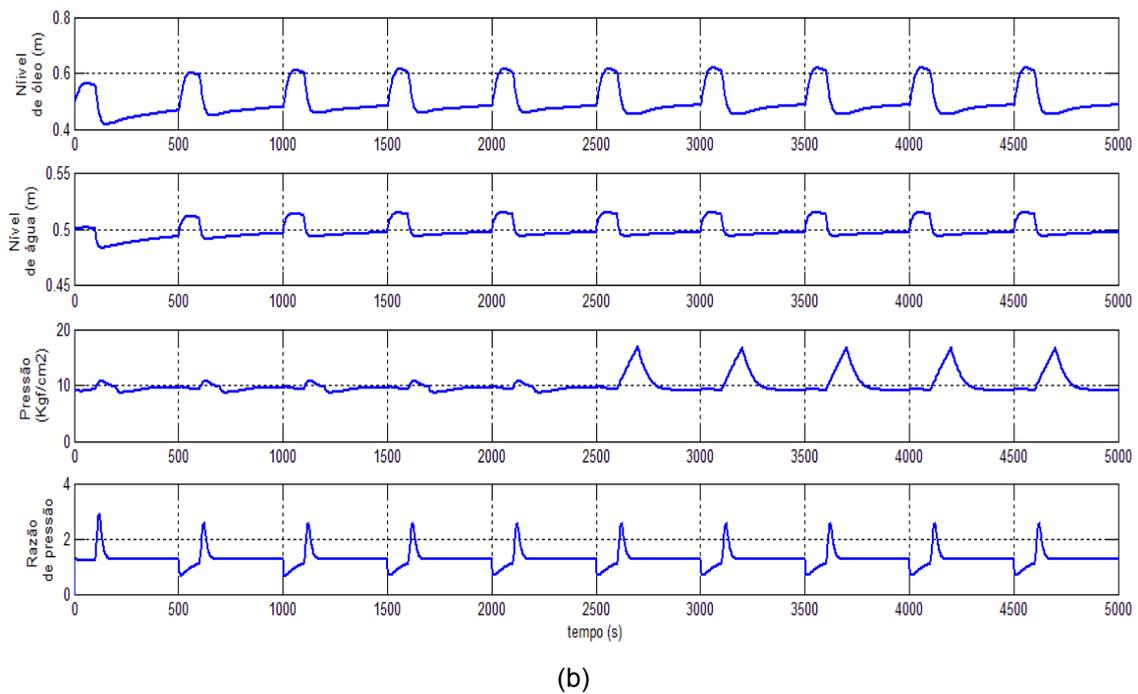
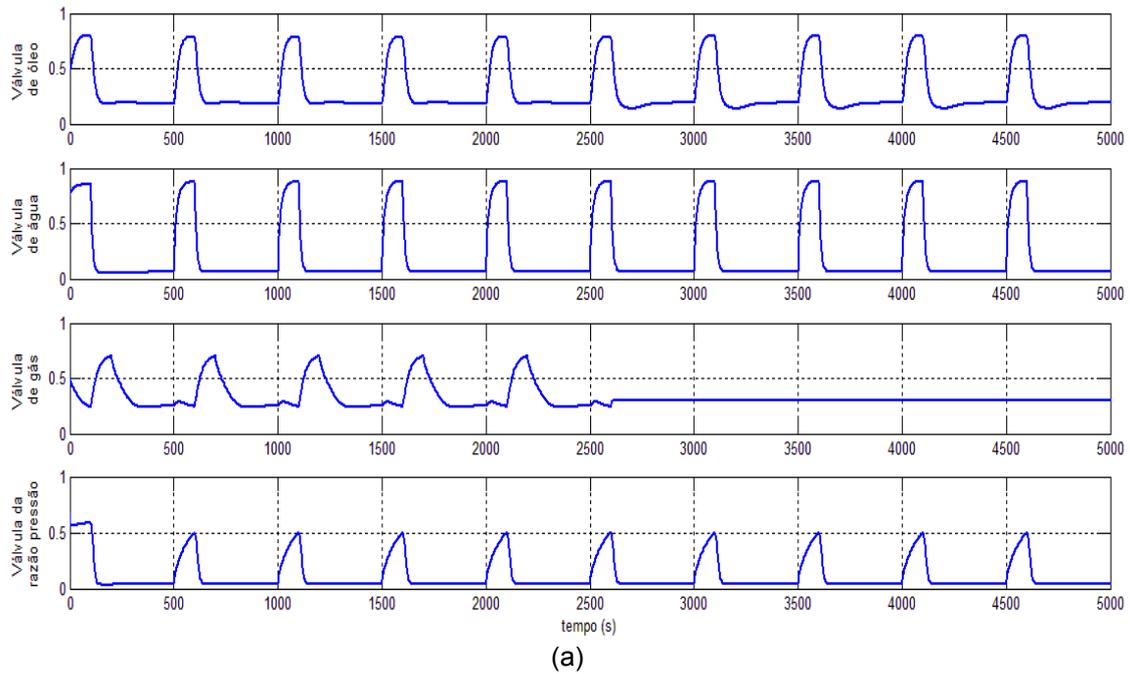


Figura 5.32: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas

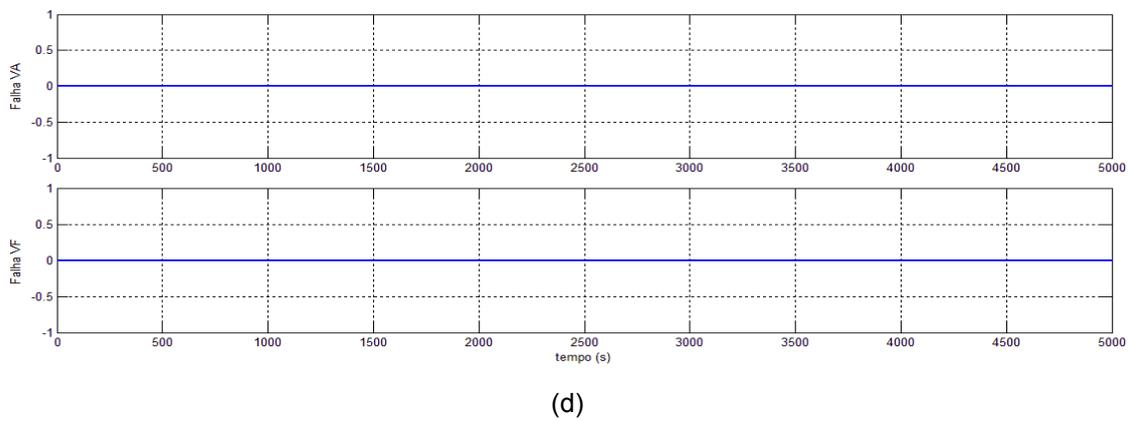
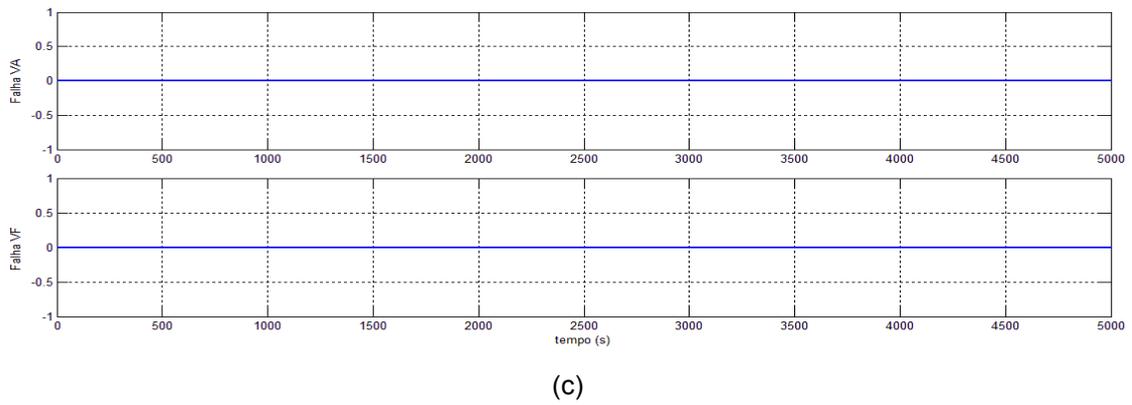
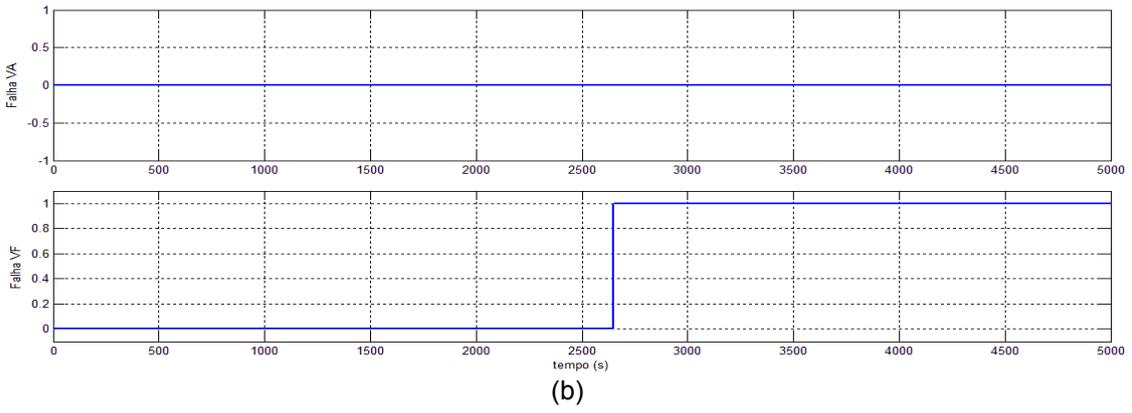
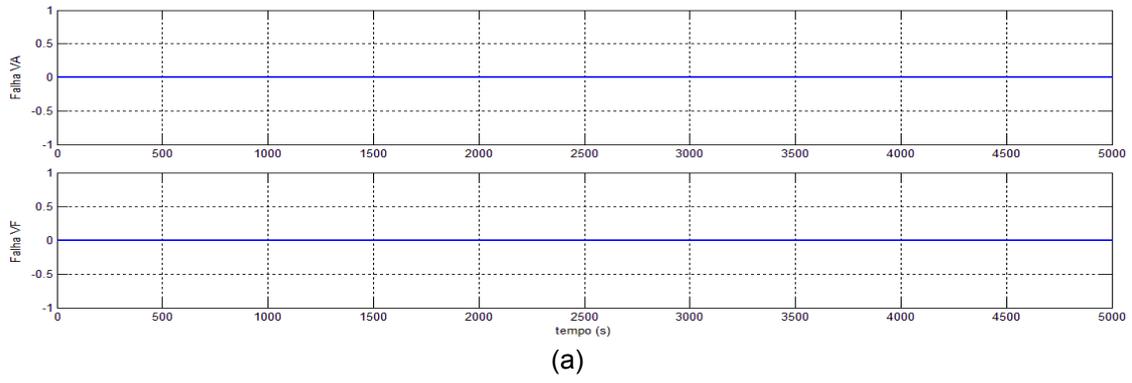
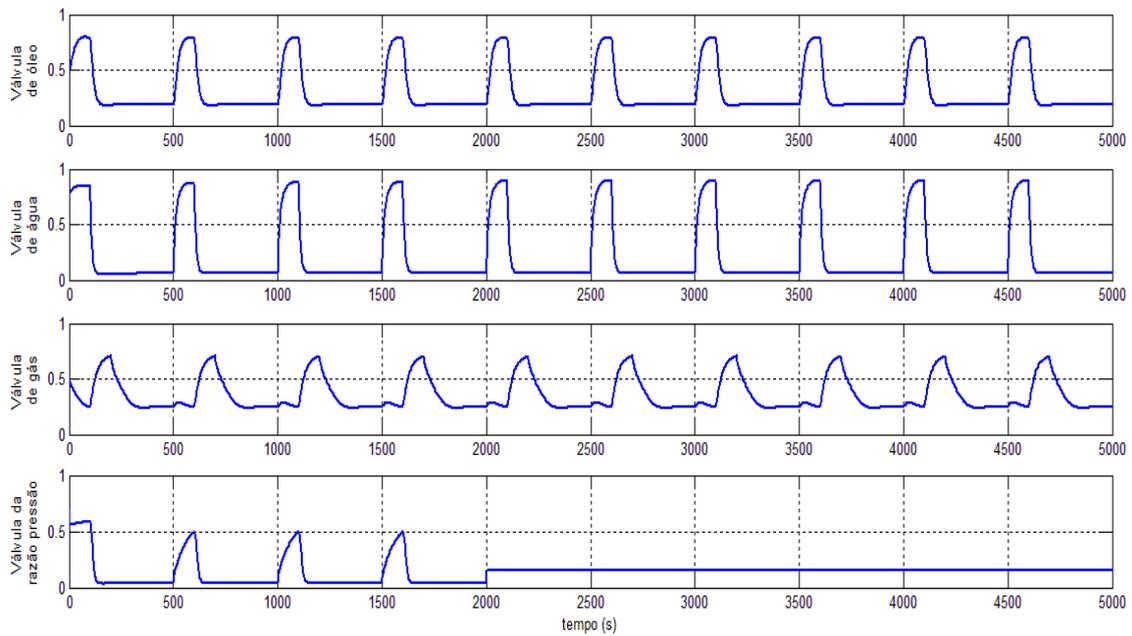
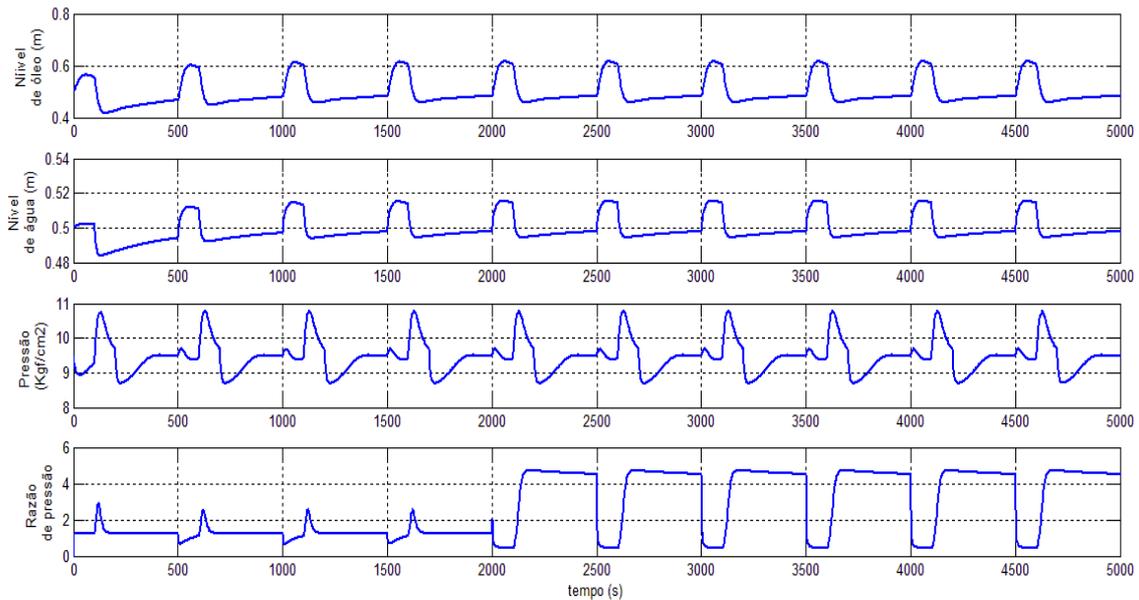


Figura 5.33: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Uma terceira simulação considera que a válvula de razão de pressão, ficou presa com abertura de 10% no instante  $t = 2000$  s, como mostrado na figura 5.34a. Da figura 5.34b, é possível observar que mesmo a falha atuando ela tem pouca influência nas variáveis de saída do processo, com exceção da razão de pressão do hidrociclone DC, cujas oscilações ficam maiores. O diagnosticador indica “Falha VF” na válvula de razão de pressão em  $t = 2105$  s (figura 5.35d). Como visualizado nas figuras 5.35a, 5.35b e 5.35c, o diagnosticador não indica a presença de mais nenhuma outra falha no sistema.

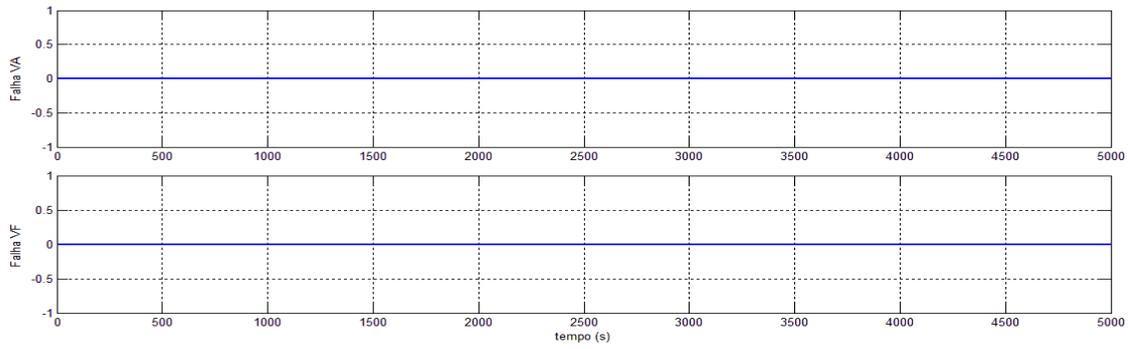


(a)

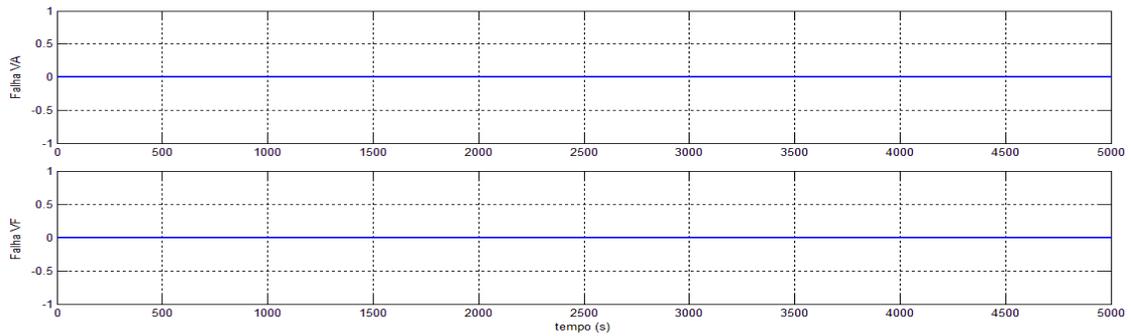


(b)

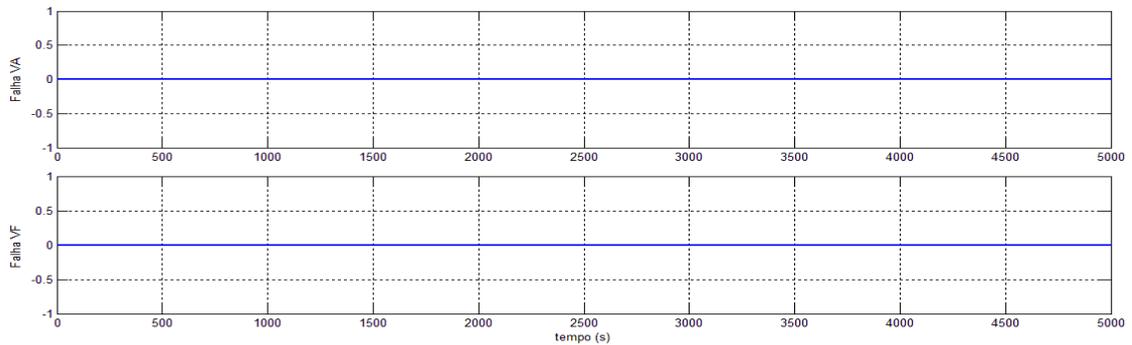
Figura 5.34: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



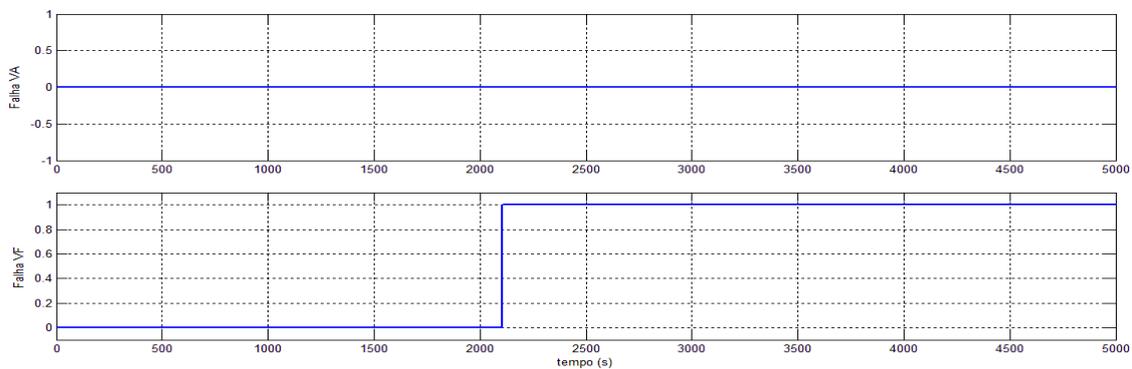
(a)



(b)



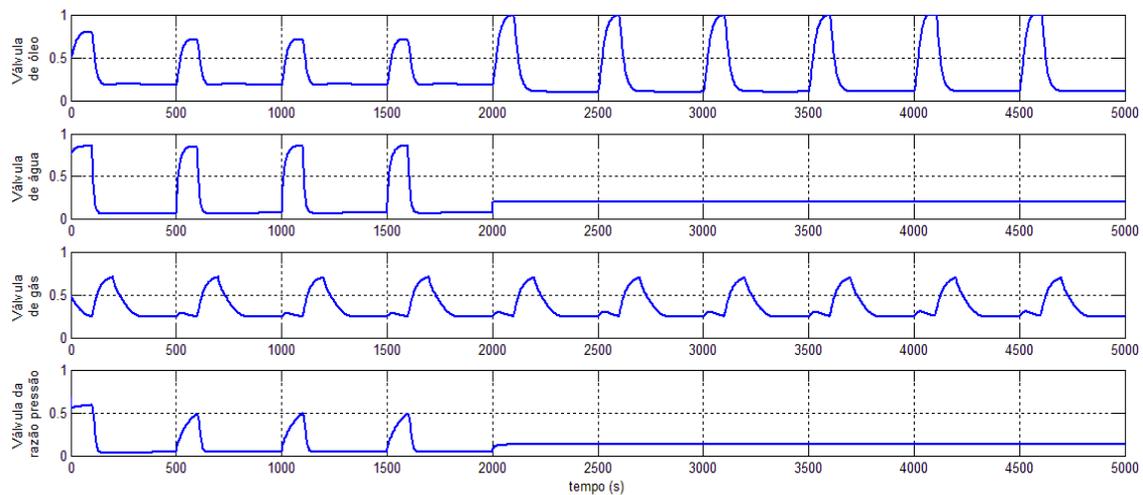
(c)



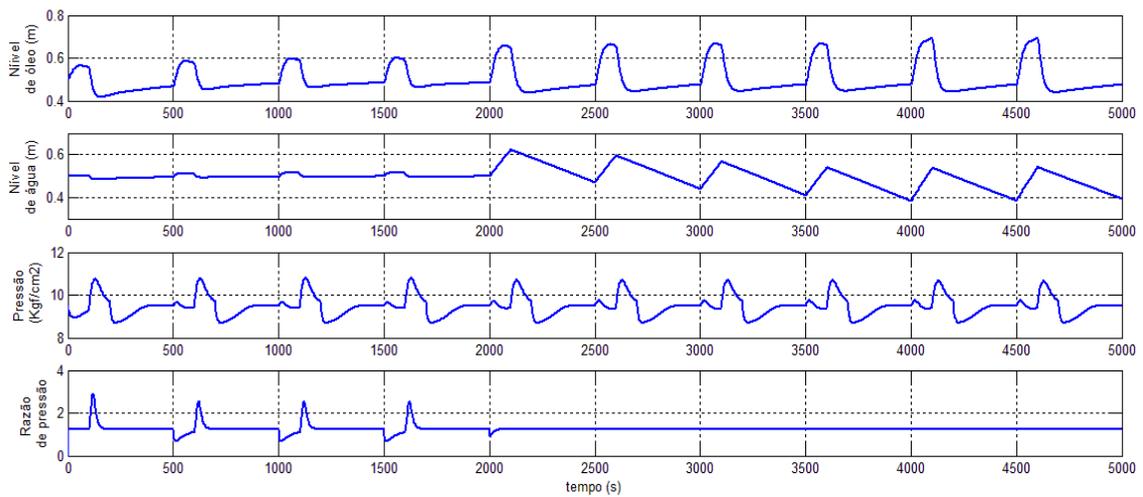
(d)

Figura 5.35: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

Finalmente, considera-se falha na válvula de água, ficando esta presa com abertura de 20% no instante  $t = 2000$  s (veja figura 5.36a). De acordo com a figura 5.36b, esta falha influencia nas outras variáveis do processo, exceto as relacionadas com a pressão no vaso. O diagnosticador indica "Falha VF" na válvula de água no instante  $t = 2020$  s, conforme a figura 5.37c. O diagnosticador também indica falha "Falha VF" na válvula de óleo no tempo  $t = 4065$  s (figura 5.37a), instante no qual a válvula satura, situação esta interpretada pelo diagnosticador como válvula presa. Apesar da válvula de óleo sair do estado de saturação por algum tempo, o diagnosticador continua indicando a presença desta falha. Este caso pode ser tratado como falha intermitente, o qual não é abordado no presente trabalho.

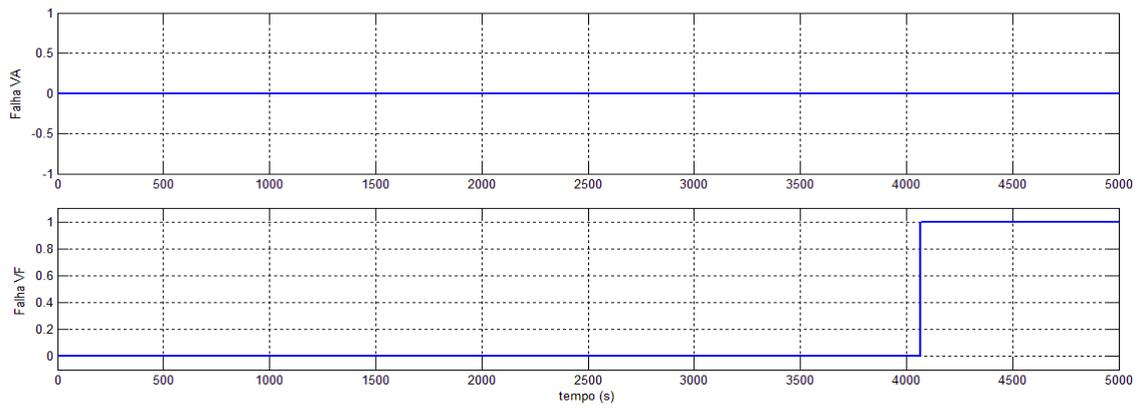


(a)

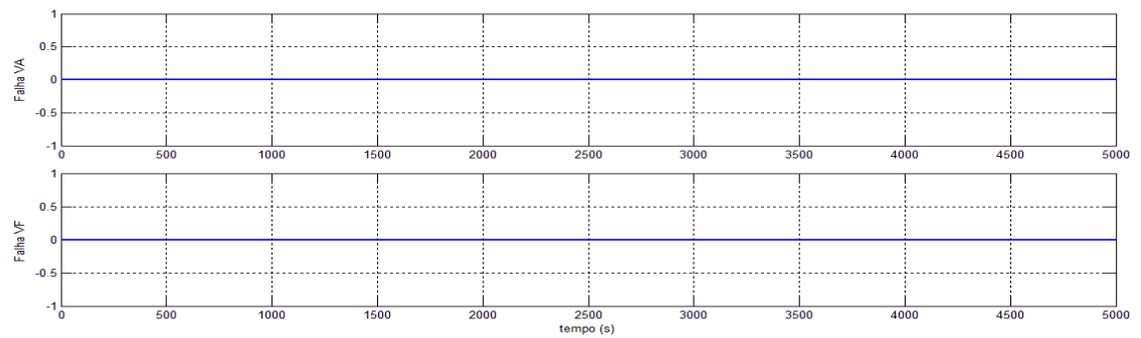


(b)

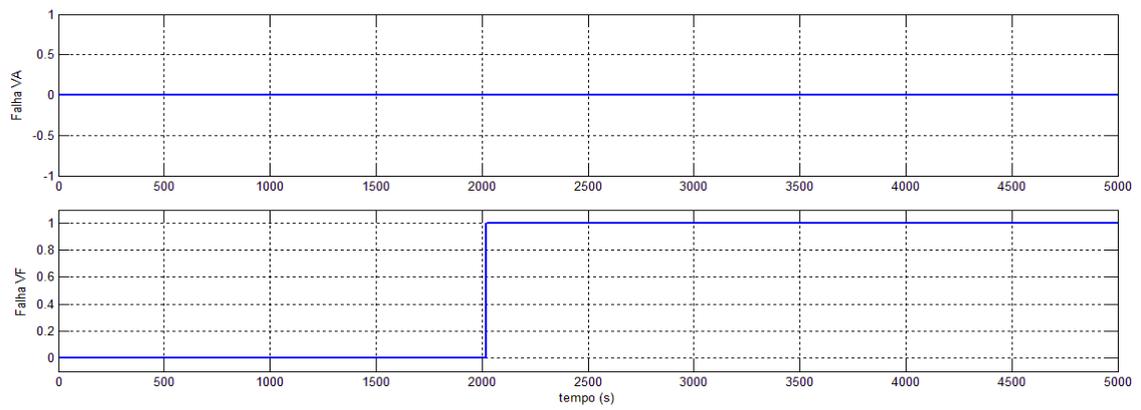
Figura 5.36: (a) Variáveis manipuladas; (b) Variáveis controladas



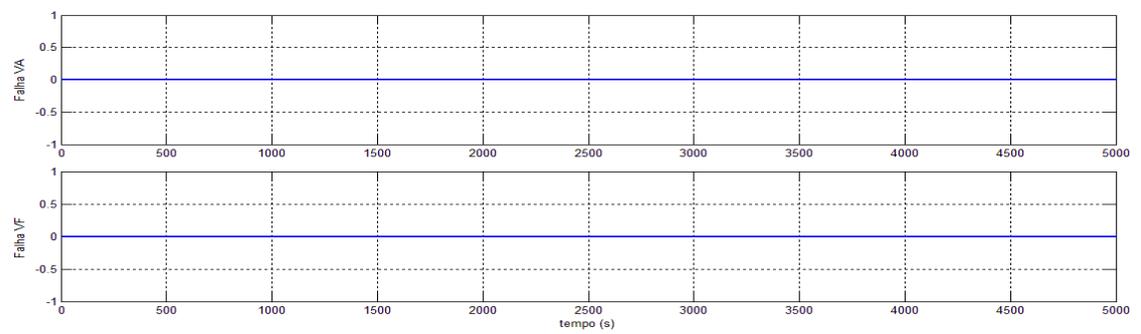
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.37: Resposta dos diagnosticadores de falhas nas válvulas: (a) falha na válvula de óleo; (b) falha na válvula de gás; (c) falha na válvula de água; (d) falha na válvula de razão de pressão

# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema inteligente de suporte operacional em processos de tratamento primário de petróleo, especificamente no sistema de separação trifásica. Para isto, foram desenvolvidos diagnosticadores de falhas para as válvulas de controle do processo. As falhas tratadas neste estudo foram do tipo válvula presa, podendo esta prender em qualquer posição de sua faixa de abertura. A teoria utilizada no projeto dos diagnosticadores foi a teoria de Sistemas a Eventos Discretos, que modela um sistema dinâmico utilizando modelos e eventos discreto de maneira que, através de estados e transições, é possível analisar os diferentes estados que o sistema dinâmico pode alcançar durante seu funcionamento. O sistema foi projetado com o auxílio do software *Desuma*® e implementado utilizando o software *Matlab/Simulink/Stateflow*®.

Para o projeto dos diagnosticadores, além dos sensores de nível foram usados sensores virtuais, que indicam se o nível está subindo ou descendo. A sintonia do diagnosticador foi feita pela técnica da tentativa e erro, de modo que esta sintonia pode variar dependendo da sintonia do controlador, que por sua vez influenciará diretamente no comportamento do processo.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, o diagnosticador funcionou de maneira adequada, diagnosticando as falhas no processo em tempo hábil para que o operador possa tomar as decisões adequadas. O diagnosticador mostrou-se robusto às perturbações na alimentação em padrão

de golfadas, situação encontrada comumente em processos de produção de petróleo *offshore*.

Listam-se a seguir algumas sugestões para dar continuidade a este estudo:

- O enriquecimento matemático do modelo, com a finalidade de aproximá-lo cada vez mais do processo real e então desenvolver diagnosticadores.
- A Modelagem de outros tipos de falhas para o processo, como falhas intermitentes e estruturais.
- A utilização de outras teorias para a construção de diagnosticadores de falhas, com a finalidade de comparar o desempenho das técnicas quando aplicadas no processo aqui estudado.
- A criação de softwares que, num mesmo pacote, sejam capazes de modelar e implementar os autômatos e que tenham uma interfase amigável.
- O desenvolvimento de uma maneira sistemática de determinar o intervalo do ciclo de varredura em relação à sintonia do diagnosticador com a finalidade de facilitar sua manutenção.
- A aplicação do sistema diagnosticador em uma planta real, utilizando CLP e sistema supervisório.

--ooOoo--

# Referências Bibliográficas

AZEVEDO JR. D. O.; SOTOMAYOR, O. A. Z. (2010). Controle de escoamentos no regime de golfadas em processos de produção de petróleo. *Revista Mecânica Computacional*, v. XXIX, nº 87, p. 8447-8461.

BASILIO J. C.; CARVALHO L.K.; MOREIRA M. V. (2010). Diagnose de falhas em sistemas a eventos discretos modelados por autômatos finitos. *Revista Controle & Automação*, 21(5): 510-533.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. (2008). *Introduction to discrete event systems*, 2nd Ed, New York: Springer.

CASTRO, R. M. (2009). *Desenvolvimento de ferramentas de apoio operacional para gerenciamento de eventos anormais de uma unidade de hidrotratamento*. Dissertação de Mestrado, Escola de Química/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

CHIANG, L. H.; RUSSELL, E. L.; BRAATZ, R. D. (2001). *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. Berlin: Springer-Verlag.

COCO, J.C. (2003). *Large property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries – the 100 largest losses 1972-2001*. Marsh's Risk Consulting Practice.

DEBOUK, R.; LAFORTUNE, S. E.; TENEKETZIS, D. (2000). Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 10(1-2): 33–86.

DE SOUZA JR., M. B. (2005). *Modelagem heurística para diagnóstico, automação e controle de equipamentos e sistemas*. Relatório Projeto MCT/FINEP/Ação Transversal – Cooperativos 02/2004.

DESUMA – Discrete Event System Group, University of Michigan (visitado em 05/12/2011).

FILGUEIRAS, N. G. T. (2005). *Modelagem, análise e controle de um processo de separação óleo/água*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

FIGUEIREDO, A. I. L.; SOTOMAYOR, O. A. Z, (2010). *Detecção, diagnóstico e correção de situações anormais em processos de produção de petróleo*. Relatório de Pesquisa PIBIC/CNPq/UFS.

HAMAD, A. A. (2006). Advances in abnormal situation prevention in refineries and petrochemical plants. In: *2006 AIChE Annual Meeting*, San Francisco-CA, USA.

HIMMELBLAU, D. M. (1978). *Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes*. Elsevier press, Amsterdam.

ISERMANN, R. (2005). *Fault-diagnosis systems. An introduction from fault detection to fault tolerance*. London: Springer-Verlag.

KASZKUREWICZ, E.; BHAYA, A.; EBECKEN, N. F. F. (1997). A fault detection and diagnosis module for oil production plants in offshore platforms. *Expert Systems with Applications*, 12(2):189 – 184.

KESHIDA, S.; DEBBACHE, N. (2005). Failure diagnosis on discrete event systems. *American Journal of Applied Sciences*, 2(11): 1547 – 1551.

LATUFO, F. A.; GARCIA, C., (2008). *Sensores virtuais ou soft-sensors: uma introdução*. In: *7<sup>th</sup> Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications*. Brasil, São Paulo.

MILNE, R. (1987). Strategies for diagnosis. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 17(3): 333-339

NWACHUKWU, O. S. (2007). *Fault tolerant level control of a two-phase separator*. MSc Thesis, Cranfield University, UK

NUNES, G. C. (1994). *Modelagem e simulação dinâmica de separador trifásico água-óleo-gás*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

NUNES, G. C. (2001). *Design and analysis of multivariable predictive control Applied to an oil-water-gas separator: a polynomial approach*. Tese de Doutorado, Universidade da Flórida, Estados Unidos.

NUNES, G. C. (2007). Modelagem dinâmica do processamento primário de petróleo: conceitos fundamentais e aplicação em controle de processos. *Boletim Técnico da Produção de Petróleo*, 2(1): 29–47.

OMANA, M.; TAYLOR, J. H., (2007). Fault detection and isolation using generalized parity vector technique in the absence of a mathematical model. In: 17<sup>th</sup> *IEEE International Conference on Control Applications (CCA'2007)*, Suntec City, Singapore.

RAMAN, R. (2005). Abnormal situation management in process control: do we have it under control?. In: 7<sup>th</sup> *World Congress of Chemical Engineering (WCCE-7)*, Glasgow, Scotland.

REIDER, C. A. (2002). *Detecção e isolamento de falhas em instrumentação de processos de produção de petróleo*. Tese de doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

RIVERA, M. H. M. (2007). *Diagnóstico, de falhas em sistemas a eventos discretos: uma proposta de aplicação a em processos de separação óleo-gás*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

RIVERA, M.; BASÍLIO, J. C.; BHAYA, A. (2007). Integrated fault diagnosis based petri nets models. In: 16<sup>th</sup> *IEEE International Conference on Control Applications*, Singapore.

ROSA, D. G. (2007). *Sistema a suporte de decisão aplicado ao processo de fracionamento do craqueamento catalítico fluidizado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

SAMPATH, M.; SENGUPTA, R.; LAFORTUNE, S.; SINNAMOHIDEEN, K. E.; TENEKETZIS, D. (1995). Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(9): 1555–1575.

SAMPATH, M.; SENGUPTA, R.; LAFORTUNE, S.; SINNAMOHIDEEN, K. E.; TENEKETZIS, D. (1996). Failure diagnosis using discrete-event models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(2): 105–124.

SANTANA, B. G. (2009). *Detecção e diagnóstico de situações anormais em sistemas de separação trifásica água-óleo-gás*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

SILVA, A. L. F.; RAMALHO, J. B. V. S.; FILHO, J. E. S.; MELO, M. V.; LEITE, M. M.; BRASIL, N. I.; JUNIOR, O. A. P.; OLIVEIRA, R. C. G.; ALVES, R. P.; COSTA, R. F. D.; KUNERT, R.; GOMES, W. (2007). *Processamento primário de petróleo*. Universidade Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVEIRA, M. A. C. R. (2006). *Controle de um processo de tratamento primário de petróleo*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

SOTOMAYOR, O. A. Z. (2008). *Controle preditivo tolerante a falhas para processos com modos integradores – uma proposta de aplicação em processos de separação água-óleo-gás*. Projeto de Pesquisa. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe.

SOUZA, L. (2009). *Noções de processamento primário de petróleo*. Universidade Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.

TEIXEIRA, E. B. (1993). *Diagnóstico inteligente de falhas em um processo de separação óleo-gás em plataformas offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

TRIGGIA, A. A.; CORREIA, C. A.; FILHO, C. V., (2001). “*Processamento Primário de Fluidos*”. In: Thomas, J. E., Barros, V., Santos, C. L., Fernandes, E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª ed., Capítulo 9, Editora Interciência: Rio de Janeiro, Brasil.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; YIN, K.; KAVURI, S.N., (2003). A review of process fault detection and diagnosis, Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3): 293–311.

WILLSKY, A. S. (1976). A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, 12(6): 601-611.