

Herlon Ayres Camargo

**Detecção e Isolação de Falhas
Utilizando Estimação de Parâmetros
de Modelos Contínuos e Limites de
Confiança Adaptativos — Aplicação
a uma Planta Piloto**

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais

Índice

<i>Resumo</i>	i
<i>Abstract</i>	ii

CAPÍTULO 1

Introdução	1
1.1 - Motivação.....	1
1.2 - Conceitos Básicos Sobre Detecção e Isolação deFalhas	2
.....	2
1.3 - Princípio de Funcionamento de um Método deDetecção e Isolação de Falhas	4
.....	4
1.4 - Controle Reconfigurável.....	5
1.5 - Objetivos Deste Trabalho.....	7
1.6 - Organização.....	8

CAPÍTULO 2

Alguns Métodos Utilizados para Detecção e Isolação de Falhas	1
2.1 - Introdução.....	1
2.2 - Métodos Baseados em Observadores de Estado.....	3
2.2.1 - Esquema do Observador Dedicado (Clark, 1978).....	4
2.2.2 - Esquema do Observador Generalizado.....	4
2.3 - Métodos Baseados em Estimacão de Parâmetros.....	7
2.4 - Métodos de DIF Baseados no Conhecimento.....	10
2.5 - Comentários Finais.....	11

CAPÍTULO 3

Modelagem Matemática do Sistema de Tanques Interativos.....	1
3.1 - Introdução.....	1
3.2 - Princípio de Funcionamento da Planta.....	3
3.3 - Modelo Matemático do STI.....	4
3.4 - Modelo matemático de falhas para o STI.....	8
3.4.1 - Falhas no processo.....	9
3.4.1.1 - Vazamento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03.....	9
3.4.1.2 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03.....	9
3.4.1.3 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-01 e TQ-02.....	10
3.4.1.4 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-03 e TQ-01.....	11
3.4.2 - Falhas nos sensores.....	11
3.4.3 - Falhas nos atuadores.....	12
3.4.3.1 - Falha na válvula de entrada FCV-01.....	12
3.4.3.2 - Falha na válvula de saída FCV-02.....	12
3.4.3.3 - Falha na bomba de entrada BA-01.....	13
3.4.3.4 - Falha na bomba de saída BA-02.....	13
3.4.4 - Modelo geral contendo todas as falhas modeladas.....	14
3.5 - Comentários Finais.....	15

CAPÍTULO 4

Estimação Recursiva de Parâmetros no Sistema de Tanques Interativos.....	1
4.1 - Introdução.....	1
4.2 - Mínimos Quadrados Recursivo.....	2
4.3 - Filtro de Variáveis de Estado.....	4
4.4 - Metodologia Adotada para a Realização da Estimação Recursiva de Parâmetros no STI.....	6
4.4.1 - Intervalo de Amostragem.....	6
4.4.2 - Filtro de Variáveis de Estado (FVE) para o STI.....	7
4.4.3 - Mínimos Quadrados Recursivo para o STI.....	13
4.4.4 - Inclusão de Termos de Erro.....	16
4.4.5 - Fixação dos Parâmetros Relacionados aos Termos de Erro.....	17
4.5 - Comentários Finais.....	19

CAPÍTULO 5

Detecção e Isolação de Falhas no Sistema de Tanques Interativos.....	1
5.1 - Introdução.....	1
5.2 - Procedimentos Adotados Para a Realização dosTestes	
.....	2
5.2.1 - Tempo de Duração dos Testes.....	2
5.2.2 - Definição dos Set-Points a Serem Utilizados nos Testes.....	2
5.2.3 - Levantamento das Curvas Características das Válvulas Atuadoras.....	3
5.2.4 - Calibração dos Sensores de Nível.....	3
5.3 - Procedimentos Adotados Para Realizar a Detecçãoe Isolação de Falhas	
.....	4
5.3.1 - Valores Nominais dos Parâmetros	4
5.3.2 - Inicialização do Vetor de Parâmetros.....	5
5.3.3 - Inicialização das Matrizes de Covariância dos Parâmetros.....	5
5.3.4 - Fixação dos Elementos das Matrizes de Covariância dosParâmetros	
.....	5
5.3.5 - Reset da Matriz de Covariância dos Parâmetros.....	6
5.3.6 - Utilização de Recursos Extras para a Detecção e Isolação de Falhas.....	6
5.3.7 - Tempo de Espera para o Algoritmo de DIF começar a atuar.....	7
5.4. - Definição dos Limites de Tolerância para Variaçãodos	
.....Parâmetros	
.....	7
5.4.1 - Introdução.....	7
5.4.2 - Ponto de Referência.....	8
5.4.3 - Largura da Faixa de Tolerância.....	10
5.4.5 - Limites de Tolerância para os Parâmetros Auxiliares d_{qi} e d_{qo}	13
5.4.6 - Tempo de Espera para a Detecção da Falha.....	14
5.5 - Comentários Finais.....	15

CAPÍTULO 6

Resultados Práticos: Comentários e a Técnica de Isolação de Falhas	1
6.1 - Introdução.....	1
6.2 - Resultados dos Testes Realizados no STI.....	1
6.2.1 - Vazamento no Duto Entre TQ-02 e TQ-03.....	2
6.2.2 - Entupimento no Duto Entre TQ-02 e TQ-03	4
6.2.3 - Entupimento no Duto Entre TQ-01 e TQ-02	6

6.2.4 - Entupimento no Duto Entre TQ-03 e TQ-01	10
6.2.5 - Falha na Válvula FCV-01.....	12
6.2.6 - Falha na Válvula FCV-02	14
6.2.7 - Falha na Bomba BA-01	16
6.2.8 - Falha na Bomba BA-02.....	17
6.2.9 - Falha no Sensor de Nível LE-01	19
6.2.10 - Falha no Sensor de Nível LE-02	21
6.2.11 - Falha no Sensor de Vazão FE-01	22
6.2.12 - Falha no Sensor de Vazão FE-02.....	24
6.3 - Isolação de Falhas.....	26
6.3.1 - Sintomas a Serem Observados.....	26
6.3.2 - Fluxograma do Método de Isolação de Falhas.....	31
6.4 - Comentários Finais.....	33

CAPÍTULO 7

Conclusões	1
Sugestões para Trabalhos Futuros.....	4

APÊNDICE A

Índice.....	1
A.3.1 - Medidor de Nível (LE/LT-01).....	110
A.3.2 - Medidor de Nível (LE/LT-02).....	110
A.3.3 - Medidor de Vazão (FE/FT-01 e FE/FT-02).....	110
A.3.4 - Válvulas Pneumáticas (FCV-01 e FCV-02).....	111

APÊNDICE B

Algoritmo de Detecção e Isolação de Falhas.....	113
B.1 - Estrutura Principal do Algoritmo de DIF.....	113
B.2 - Inicialização do Algoritmo.....	114
B.3 - Atuação das Válvulas / Leitura das Variáveis.....	114
B.4 - Filtragem dos Sinais.....	114
B.5 - Estimação dos Parâmetros.....	114
B.6 - Definição dos Limites de Tolerância.....	115

B.7 - Verificação da Ocorrência de Falha.....	115
B.8 - Alarme.....	115
B.9 - Reset da Matriz de Covariância.....	115
B.10 - Isolação da Falha.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

*À minha esposa Ângela
e ao meu filho Matheus
pelo grande amor e atenção
que me deram durante esta jornada.*

Agradecimentos

Ao Professor Luis Antonio Aguirre, pela orientação recebida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Fábio Jota, por permitir a utilização da Planta dos Tanques Interativos.

Ao Marcus Felipe, pelo grande apoio recebido no período inicial deste trabalho.

Ao pessoal do LCPI, pela amizade desenvolvida durante estes anos, e em especial ao Cristiano e ao Leonardo, pela grande ajuda que me deram nas várias etapas deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais Ladislau e Lucy, e ao meu irmão Fernando por permitirem que eu pudesse chegar até aqui.

A Deus, pela saúde e pela coragem que tive durante a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a implementação de um método capaz de detectar e isolar falhas numa planta piloto de tanques interativos. O método descrito neste trabalho baseia-se na estimação recursiva de parâmetros para um modelo matemático contínuo no tempo.

Alguns problemas em estimar parâmetros de modelos contínuos foram encontrados. Entre estes problemas pode-se citar a dificuldade de se estimar derivadas no tempo de sinais ruidosos que foi resolvida com a utilização do Filtro de Variáveis de Estado. Vários ajustes específicos no algoritmo de estimação de parâmetros foram realizados para melhorar o método de detecção e isolação de falhas.

Um procedimento lógico para isolação de falhas foi desenvolvido e apresentou resultados satisfatórios. Este procedimento é também capaz de quantificar uma falha em fraca, média ou grave.

Vários testes foram executados na planta para a sintonia do algoritmo de detecção e isolação de falhas. Os resultados gráficos mais característicos de cada tipo de falha são apresentados e discutidos.

Abstract

This work describes the development and implementation of a fault detection and isolation method applied to an interactive tank pilot plant. This method is based on recursive parameter estimation of a continuous-time mathematical model.

Some problems related to the estimation of continuous-time model parameters were found. The main problem was the difficulty of estimating time derivatives of noisy signals, and this was solved with a state variables filter. Specific tunings were made to the parameter estimation algorithm thus improving the fault detection and isolation method.

A procedure for fault isolation was developed and yielded promising results. This procedure is able to quantify a fault as weak, median or serious.

Different tests were made using the plant for algorithm tuning. Typical results of each fault are presented and discussed.

1 ***Introdução***

1.1 - Motivação

Com o avanço da tecnologia e dos computadores nos últimos anos é possível melhorar ainda mais os algoritmos de monitoração a ponto de se ter conhecimento sobre falhas que podem estar ocorrendo no sistema supervisionado e com isso impedir danos maiores ao processo. Computadores cada vez mais velozes, com capacidade de armazenamento de dados maior e preços mais acessíveis, permitem a execução de estratégias de controle e monitoração mais robustas em tempo real. Por causa da redução das perdas de tempo e material no processo, e da melhoria da qualidade do produto, a relação custo-benefício diminui e a indústria passa a adotar sistemas inteligentes que além de controlar, irão também detectar e localizar falhas no processo (Isermann, 1984, 1993; Frank, 1990; Frank & Seliger, 1991).

Uma das principais preocupações dos engenheiros é aumentar a confiabilidade; segurança e disponibilidade de processos e plantas industriais, visando uma melhor qualidade do produto, proteção aos operadores e redução do custo final dos processos de produção. Atenção especial tem que ser dada quando há risco de vida humana. Atualmente, processos como reatores químicos, usinas nucleares, missões espaciais e outros utilizam de alguma forma dispositivos de segurança para indicarem o surgimento de alguma falha (Willsky, 1976; Isermann, 1984; Patton et al., 1989; Frank & Seliger,

1991; Korbicz et al., 1993; Patton, 1993). Estes dispositivos devem ser automáticos para diminuir ou, se possível, eliminar o contato direto do operador humano (Isermann, 1993). Naturalmente, a segurança dessas operações depende criticamente dos dispositivos envolvidos. Falhas ou mal funcionamento destes dificultam e perturbam a operação normal de um processo automático, causando um desempenho inaceitável do sistema, podendo conduzi-lo inclusive a condições de operação perigosa.

Acidentes com aviões comerciais poderiam ter sido evitados se houvesse um sistema de detecção e isolamento de falhas. Um DC 10 da *American Airlines* caiu sobre Chicago em 1979 quando o piloto não possuía a informação de que havia ocorrido uma falha em um de seus atuadores. Estudos posteriores comprovaram que este acidente poderia ter sido evitado se o piloto dispusesse de tal informação (Patton, 1993).

O Sistema de Tanques Interativos do Laboratório de Controle de Processos Industriais é uma planta piloto construída com sensores, atuadores e *hardware* semelhantes aos que são usados na indústria (Abreu, 1993; Braga, 1994; Jota 1995). Esta característica permite que sejam testados algoritmos de detecção e isolamento de falhas satisfatoriamente (Pereira, 1996). Detalhes sobre os Sistema de Tanques Interativos podem ser obtidos no capítulo 3 e no apêndice A deste trabalho.

1.2 - Conceitos Básicos Sobre Detecção e Isolação de Falhas

Falha ou *falta* é um mal funcionamento de um determinado processo. As falhas afetam o processo e o controle, devendo ser eliminadas o mais depressa possível. Geralmente as falhas impedem ou desviam um processo de seu ponto de operação aceito como normal, levando-o a condições que em alguns casos são perigosas tanto para o sistema quanto para o operador (Frank & Seliger, 1991). As falhas podem ocorrer no processo, na instrumentação ou nos atuadores. O tipo de *falhas no processo* são, por exemplo, um vazamento (processo hidráulico) ou um curto-circuito (processo elétrico). Já as *falhas na instrumentação* são, por exemplo, o rompimento de um cabo que transmite informação sobre o valor medido de alguma variável ou um medidor mal calibrado. As falhas na instrumentação estão relacionadas às funções de monitoração. O terceiro tipo, *falhas nos atuadores*, pode ser exemplificado como o travamento de uma válvula pneumática. Este tipo de falha afeta diretamente as funções de controle do processo (Frank & Seliger, 1991).

As falhas podem ainda ser classificadas como *abruptas* ou *lentas* (Frank, 1990). As falhas abruptas se manifestam pela sua evolução rápida, como por exemplo a quebra de um eixo num sistema mecânico. As falhas lentas são as que evoluem vagarosamente no tempo e geralmente podem ser controladas e possivelmente eliminadas. O acúmulo de sujeira numa tubulação pode ser considerado como exemplo de falhas que evoluem vagarosamente, uma vez que este tipo de entupimento se processa de forma lenta.

O primeiro passo para eliminação de uma falha num sistema supervisionado é a sua *deteção* e *isolação* (Frank & Seliger, 1991). O termo *deteção* se refere ao fato de termos o conhecimento de que uma falha ocorreu ou está ocorrendo no sistema, enquanto que o termo *isolação* determina a localização desta falha, ou seja, a identificação do instrumento, atuador ou componente falho e em certos casos à discriminação de que tipo de falha ocorreu.

Tradicionalmente, a deteção e isolação de falhas (DIF) é feita por *redundância de hardware* ou também chamada de *redundância física* (Patton et al., 1989). A informação sobre o instante de ocorrência e a localização de uma falha é garantida pela repetição de instrumentos de medida, atuadores e componentes do processo. Estes elementos são instalados no sistema supervisionado em posições previamente definidas de modo que seja possível estabelecer regras para verificar a ocorrência e identificação de uma falha. Por exemplo, sensores medindo a mesma variável são instalados redundantemente a fim de comparar os valores de suas leituras, enquanto que um sensor apenas seria suficiente para o andamento do processo. Uma lógica adequada compara estes sinais medidos ignorando pequenas diferenças devido a ruídos eletromagnéticos e erros inerentes de instrumentos, e indica falhas nos casos em que esta diferença ultrapassa valores previamente definidos. A redundância de *hardware* é essencialmente usada em controle de aeronaves, missões espaciais e usinas nucleares (Patton et al., 1989).

Um novo método tem sido estudado por vários pesquisadores para a redução, ou se possível, a eliminação do excesso de hardware dos sistemas monitorados. Este procedimento é chamado de *redundância de software* ou *redundância analítica* (Patton et al., 1989). Consiste em substituir um ou mais sensores por modelos matemáticos estáticos ou dinâmicos do processo sob supervisão. O comportamento do sistema, aceito como normal, é obtido do modelo matemático e comparado com o comportamento atual do sistema. O resultado desta comparação irá dizer se o sistema está em condições normais (sem falha) ou não. Normalmente, os sinais de atuadores e sensores, ou seja a entrada e a saída do sistema, respectivamente, são monitorados. Os valores das variáveis monitoradas são analisados em relação a certos limites, e alarmes irão dizer se há falha

no processo. Os métodos matemáticos utilizados na detecção e isolamento de falhas envolvem aspectos de processamento de sinais, estimação de estados e parâmetros, filtros adaptativos, análises estatísticas e até mesmo decisões lógicas baseadas na experiência de operadores, que conhecem o funcionamento do sistema (Isermann, 1984).

Há várias vantagens da redundância de *software* sobre a redundância de *hardware* (Frank & Seliger, 1991; Patton et al., 1989). Na redundância analítica, em princípio, nenhum dispositivo físico adicional é necessário para realizar a detecção e isolamento de falhas. Um algoritmo de DIF pode aproveitar os recursos computacionais já existentes que realizam as atividades de monitoração e controle do sistema. O computador utilizado deverá ser capaz de executar os algoritmos de monitoração, controle e de DIF simultaneamente. A redundância física tem como desvantagens:

- o custo adicional para aquisição, instalação e manutenção dos componentes extras;
- o espaço adicional para a instalação destes componentes, espaço que poderia ser ocupado por outros dispositivos;
- a introdução de componentes extras, além de aumentar o peso da planta, poderá também introduzir falhas adicionais.

1.3 - Princípio de Funcionamento de um Método de Detecção e Isolação de Falhas

Num processo de DIF, seja um método baseado em redundância física ou redundância analítica, o princípio de funcionamento será sempre o mesmo. Valores de variáveis serão medidos, ou então estimados, e posteriormente estas variáveis ou variáveis auxiliares (resíduos) serão comparadas entre si ou com valores limites. Pode-se também fazer uma análise estatística, utilizando conceitos de densidade espectral, covariância, e outros (Watanabe, 1989; Hassan et al., 1992; Nikiforov et al., 1993; Zhang et al., 1994). Resultados de comparações que não se enquadrarem nos padrões normais de funcionamento irão gerar alarmes indicando a presença de falhas no processo. Uma ação apropriada pode ser inicializada imediatamente, chamada de *proteção automática* (Isermann, 1993). É comum também observar-se a evolução da falha, quando esta não acontece de forma abrupta. Ao longo desta observação, decisões sobre a operação da planta serão tomadas, podendo haver a parada imediata do processo ou a mudança de

seu funcionamento. Se a falha é tolerável, isto é se ainda for possível garantir o bom desempenho do sistema, a operação poderá continuar do mesmo modo, ou se preciso, reconfigurar alguma parte do processo até que seja possível parar a operação e eliminar a falha. As falhas, sempre que possível, deverão ser eliminadas em tempo hábil para não ocorrer danos ao processo, produto ou operador humano.

1.4 - Controle Reconfigurável

Depois de ser detectada e localizada uma falha e não havendo a necessidade de interrupção do processo, é conveniente que se faça uma reconfiguração no funcionamento do sistema. O controle reconfigurável vem recebendo nos últimos anos crescente atenção (Gertler, 1988; Stengel, 1991; Rauch, 1994, 1995; Narendra et al., 1995).

Há duas categorias distintas a serem seguidas no controle reconfigurável (Rauch, 1995):

- utilizando *múltiplos modelos* para representar as características alteradas no sistema;
- utilizando *técnicas adaptativas* para atualizar as características alteradas.

O método de múltiplos modelos adota outro modelo para o sistema e reprojeta o controle baseado no novo modelo. O método de controle adaptativo modifica o controle menos bruscamente, ou seja, seu controle é alterado continuamente de acordo com a aquisição de dados (Rauch, 1995).

A idéia básica do método de múltiplos modelos é possuir vários modelos possíveis, com seus respectivos controles, para várias situações diferentes. Quando um modelo é selecionado, o controle associado a este modelo é utilizado. Este método pode ser usado em conjunto com os métodos de DIF, quando um modelo representará o processo sem falhas e os demais modelos representarão alguma falha particular (Rauch, 1994). Ocorrendo uma falha, o modelo apropriado passará a funcionar imediatamente, representando o sistema naquela condição de falha, e o controle reconfigurado correspondente será inicializado para esta condição específica. O método de múltiplos modelos poderá ser de grande utilidade nos casos de falhas em que há perda de informação de sensores ou perda de comando dos atuadores. Os modelos que substituirão o modelo sem falhas deverão levar em consideração a não disponibilidade de manipulação de certas variáveis. “Se o controle reconfigurado for estável para cada

modelo individual, então o controle envolvendo mudanças de um controle para outro será também estável ao longo de toda a operação, isto com pequeno intervalo de tempo decorrido entre as mudanças” (Narendra & Balakrishnan, 1994). A figura 1.1 mostra o diagrama de blocos de um sistema com controle reconfigurável utilizando múltiplos modelos.

O método de modelo adaptativo para reconfiguração de controle é usado para uma adaptação contínua das características alteradas do modelo, ao contrário do método de múltiplos modelos que possui uma mudança repentina na estratégia de controle. O modelo inicial é baseado em informações *a priori* da estrutura do sistema (Rauch, 1995). O modelo e seu correspondente controle podem ser ajustados a cada nova aquisição de dados, de acordo com as mudanças ocorridas na estrutura do processo.

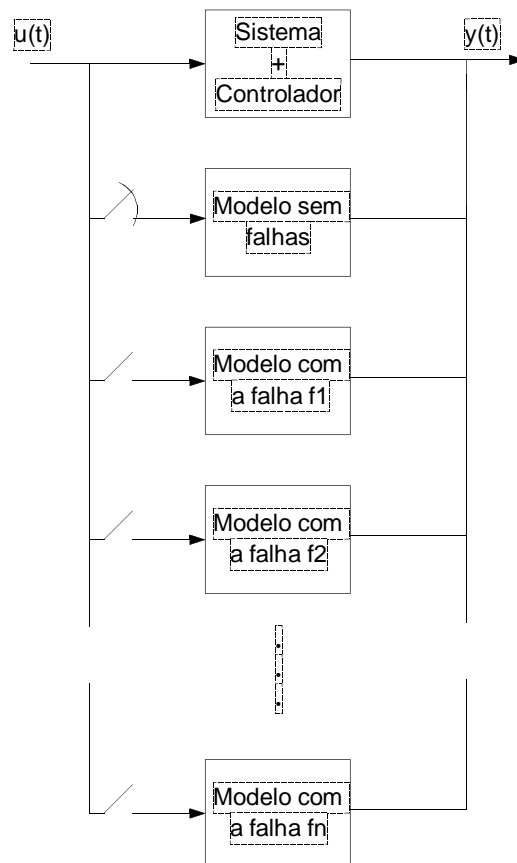


Figura-1.1 - Sistema com controle reconfigurável, atuando sem falhas.

1.5 - Objetivos Deste Trabalho

Na área de estudos em detecção e isolamento de falhas, este é o segundo trabalho desenvolvido no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (CPDEE) e vem dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Pereira (1996). Um outro trabalho nesta área vem sendo desenvolvido utilizando o modelo matemático do Sistema de Tanques Interativos (STI) (Caminhas et al., 1996).

O principal objetivo do presente trabalho é desenvolver um método de DIF para ser implementado na planta piloto do STI do LCPI. Este método deverá ser capaz de detectar e isolar algumas falhas abruptas em sensores, atuadores e no próprio processo.

O método de DIF usará como ponto de partida a estimação recursiva de parâmetros. Serão estimados os parâmetros de um modelo matemático contínuo no tempo a partir de dados medidos diretamente na planta piloto. O motivo da escolha do modelo contínuo

foi de se poder estimar parâmetros que tenham significado físico, para facilitar a criação de procedimentos para a isolamento das falhas. A estimação de parâmetros neste trabalho é vista como uma ferramenta para o método de DIF.

Para alguns procedimentos de detecção e isolamento de falhas é necessário primeiro um conhecimento profundo sobre o sistema a ser monitorado. A construção do método de DIF em questão e a sua sintonia requer ajustes específicos e exclusivos para que o método funcione satisfatoriamente. A principal contribuição deste trabalho se originou da tentativa de se adaptar o método de DIF, desenvolvido neste trabalho, ao STI da melhor maneira possível. Vários artifícios foram usados para que os parâmetros estimados fornecessem as informações necessárias sobre a ocorrência de falhas de forma mais rápida possível. Entre estas alternativas pode-se citar a manipulação da matriz de covariância dos parâmetros, a manipulação dos termos de erro no vetor de regressores, variação dos parâmetros monitorada pelos limites de tolerância adaptativos e o procedimento lógico para isolamento de falhas. A solução das dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e implementação de um método de DIF para uma planta piloto é a principal contribuição deste trabalho. Apesar dos ajustes serem específicos, considera-se que o procedimento (filosofia) é mais geral e os métodos apresentados aqui poderão ser utilizados em outros trabalhos.

Espera-se que este trabalho encoraje outras pessoas a tentarem estabelecer procedimentos específicos para detecção e isolamento de falhas em processos reais apesar das inúmeras dificuldades que possam aparecer no caminho.

1.6 - Organização

Esta dissertação está dividida em sete capítulos e dois apêndices.

O presente é uma breve introdução sobre o assunto de detecção e isolamento de falhas. São apresentadas algumas definições básicas para o entendimento deste trabalho, e as diferenças, vantagens e desvantagens da redundância de *hardware* e de *software*. É dado um conceito de controle reconfigurável, para que possa servir como estímulo para futuros trabalhos na área de detecção e isolamento de falhas. Por fim, os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados alguns métodos de DIF encontrados em referências, sem aprofundar em nenhum dos métodos. O objetivo deste capítulo, portanto, é introduzir o leitor nesta área, formando uma base de conhecimento no assunto.

O capítulo 3 revê o modelo matemático do STI que é a planta piloto utilizada durante todo este trabalho. Descreve seu princípio de funcionamento e suas principais características. A segunda parte deste capítulo mostra o modelo matemático do STI para o caso de falhas no sistema. Discute também as falhas que serão implementadas nos testes.

O método de estimação recursiva de parâmetros por mínimos quadrados é discutido no capítulo 4. As alterações no algoritmo de estimação de parâmetros para melhorar a detecção e isolamento de falhas, que foram desenvolvidas especificamente para este trabalho, são apresentadas, como por exemplo, a inclusão de termos de erro no vetor de regressores e a fixação dos parâmetros relacionados aos termos de erro. O capítulo 4 mostra também a implementação do filtro de variáveis de estado aplicado à planta em questão.

O capítulo 5 traz os procedimentos adotados neste trabalho para realizar a detecção e a isolamento de falhas. São definidos os limites de tolerância para variação dos parâmetros utilizando-se uma técnica de limites adaptativos, desenvolvida neste trabalho. Esta técnica permite que pequenas perturbações na estimativa dos parâmetros, que não sejam efetivamente falhas, possam passar despercebidas, evitando-se alarmes falsos. Também é apresentado neste capítulo um procedimento para que os parâmetros convirjam mais rapidamente após a ocorrência de uma falha.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos testes realizados na planta de tanques interativos para todos os tipos de falhas testadas. O método lógico de isolamento de falhas desenvolvido neste trabalho para o STI é apresentado e discutido. No capítulo 7 estão a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta algumas características técnicas e construtivas do STI, e por fim o Apêndice B mostra como o método de DIF foi implementado no STI.

2 *Alguns Métodos Utilizados para Detecção e Isolação de Falhas*

2.1 - Introdução

Este capítulo tem como objetivo mostrar ao leitor alguns métodos utilizados para a Detecção e Isolação de Falhas (DIF) encontrados na literatura. Estes métodos serão brevemente apresentados e alguns outros apenas citados, mostrando a grande diversidade de métodos que vêm sendo estudados.

Há duas linhas de trabalho distintas quando o assunto é a escolha do método de DIF a ser utilizado em uma planta real (Frank, 1990; Isermann, 1993):

- i) métodos de DIF baseados no modelo matemático do processo;
- ii) métodos de DIF baseados no conhecimento do processo.

A base de todo procedimento de redundância analítica é usar um modelo matemático adequado do processo a ser supervisionado (Frank & Seliger, 1991). Há modelos diferentes para realizar a detecção de falhas e a isolação de falhas. Na *detecção de falhas* é usado satisfatoriamente um modelo chamado *modelo representativo* (Frank & Seliger, 1991). Este tipo de modelo descreve com simplicidade as características do processo e pode ser utilizado em testes de algoritmos de controle e observação da planta

em diversos pontos de operação (Aguirre, 1994). O modelo representativo tenta apenas estabelecer uma relação entre as entradas e saídas do sistema.

Para a *isolação de falhas* é necessário um modelo diferente do que é utilizado para detecção de falhas. Este outro tipo de modelo é chamado de *modelo de diagnóstico* (Frank & Seliger, 1991). O modelo de diagnóstico exprime o comportamento do processo levando-se em consideração todas as interações entre as diversas partes do sistema. Ele representa com mais detalhes o comportamento dinâmico do processo em diferentes condições de trabalho, sendo portanto mais completo que o modelo representativo.

Um modelo de diagnóstico pode ser transformado em um modelo representativo através de simplificações na sua estrutura. Estas simplificações são normalmente aceitáveis quando a finalidade é o controle do processo, porém se o intuito for a isolação de falhas, tais simplificações devem ser feitas com cuidado. Num método de DIF, modelos de diagnóstico podem ser um pouco simplificados desde que atendam às exigências de eficiência do método. A questão agora é saber que falhas devem ser detectadas e localizadas para se construir o modelo a ser utilizado. Maiores detalhes sobre modelos representativos e modelos de diagnóstico podem ser obtidos em (Frank & Seliger, 1991).

Há também um terceiro tipo de modelo, chamado de *modelo de falhas* (Pereira et al., 1996). Este modelo é baseado na física do processo e descreve o comportamento do sistema na ocorrência de falhas no sistema. As principais vantagens do modelo de falhas são:

- poder simular o comportamento do sistema nas mais diferentes condições de falhas;
- ser utilizado para estudar e testar técnicas de controle reconfigurável.

Alguns métodos elaborados, para a realização da DIF, que se fundamentam na comparação de valores medidos com valores estimados ou calculados, têm como ferramenta principal a geração de resíduos que irão fornecer informações sobre o tempo, tipo e localização das falhas (Patton et al., 1989; Frank & Seliger, 1991). Sinais medidos de entrada e saída do sistema serão processados para a obtenção de resíduos. Idealmente, os resíduos serão iguais a zero no caso em que não há falhas no sistema. Resíduos diferentes de zero mostram que há indícios de falhas. Imperfeições nos modelos devidas a considerações e simplificações e ruídos indesejados nas medições e no processo, bem como a influência de distúrbios externos, fazem com que geralmente

os resíduos sejam diferentes de zero mesmo nas condições em que não há ocorrência de falhas. Para solucionar este problema, limites de tolerância são adotados para que o método de DIF não indique alarmes sem a ocorrência de falhas. Quando os resíduos ultrapassam os limites estabelecidos, uma decisão lógica é empregada para analisar e indicar a ocorrência da falha (Isermann, 1993). Um diagrama de blocos mostrando as etapas de um método de DIF é mostrado na figura 2.1.

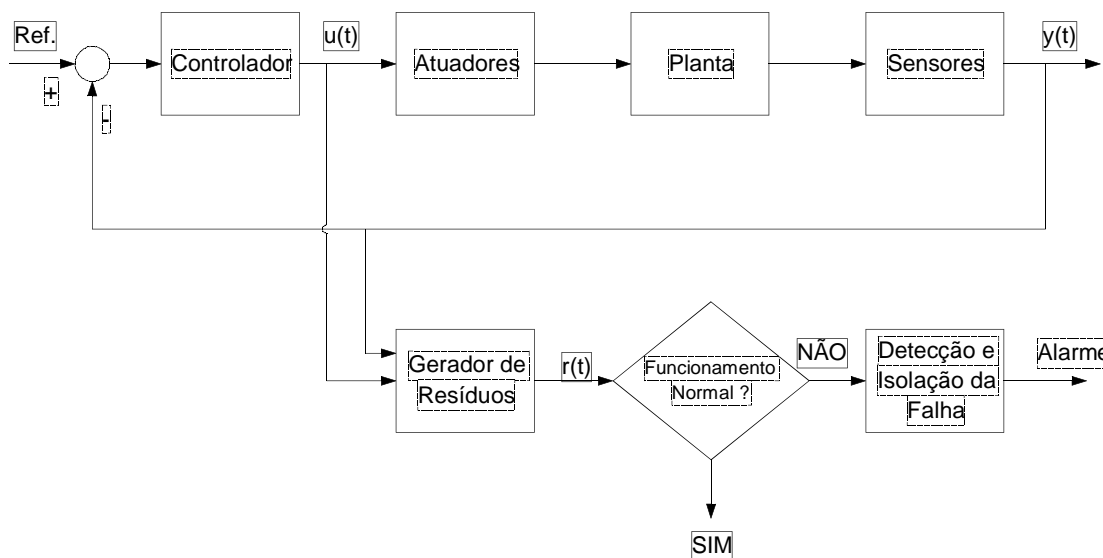


Figura-2.1 - Esquema de um algoritmo de DIF genérico.

Os resíduos podem ser gerados por vários métodos matemáticos. Exige-se que o método seja robusto ao ruído para evitar alarmes falsos. Alguns tipos de métodos serão apresentados a seguir.

2.2 - Métodos Baseados em Observadores de Estado

O princípio básico dos métodos de DIF baseados em observadores de estado é comparar a saída real, ou os estados reais, com a saída estimada, ou os estados estimados. Os dados reais são obtidos através dos sensores instalados no processo e dos sinais de controle enviados para os atuadores. Já os dados estimados são obtidos através dos observadores de estado. A diferença entre um dado real e seu respectivo dado estimado é o chamado *resíduo* (Frank & Seliger, 1991). O modelo deve ser preciso o suficiente para que na condição sem falha o resíduo seja o mais próximo possível de zero. Quando houver falhas, o resíduo deverá conter informações suficientes sobre as falhas.

Os sinais de entrada juntamente com os sinais de saída do sistema são fornecidos ao observador que irá estimar os estados do processo.

2.2.1 - Esquema do Observador Dedicado (Clark, 1978)

Quando há uma preocupação maior em localizar uma falha e não apenas em detectá-la, o esquema do observador dedicado pode ser empregado satisfatoriamente. A idéia principal consiste em utilizar não apenas um, mas vários observadores para supervisionar o processo.

Quando se comparar os sinais medidos com os sinais estimados, haverá vários resíduos diferentes, um para cada observador. Chamando-se os resíduos de r_i , onde $i=1,2,\dots,q$, sendo q o número de observadores correspondentes aos instrumentos supervisionados, é possível isolar uma falha através de uma verificação lógica apropriada. Este sistema detectará uma falha f_i , quando o resíduo r_i ultrapassar os valores toleráveis devido a uma falha no i -ésimo instrumento. A figura 2.2 mostra o esquema do observador dedicado.

2.2.2 - Esquema do Observador Generalizado

Um método similar ao esquema do observador dedicado é o esquema do observador generalizado. Ao contrário do esquema do observador dedicado, neste outro esquema o i -ésimo observador recebe informações de todos os q sensores, menos do i -ésimo sensor. A decisão lógica é baseada nos q resíduos para isolar uma única falha. A vantagem do esquema do observador generalizado sobre o esquema do observador dedicado é ser mais robusto a distúrbios desconhecidos e erros de modelagem, mas por outro lado o esquema de observadores dedicados é mais apropriado para a detecção de falhas simultâneas (Clark, 1989).

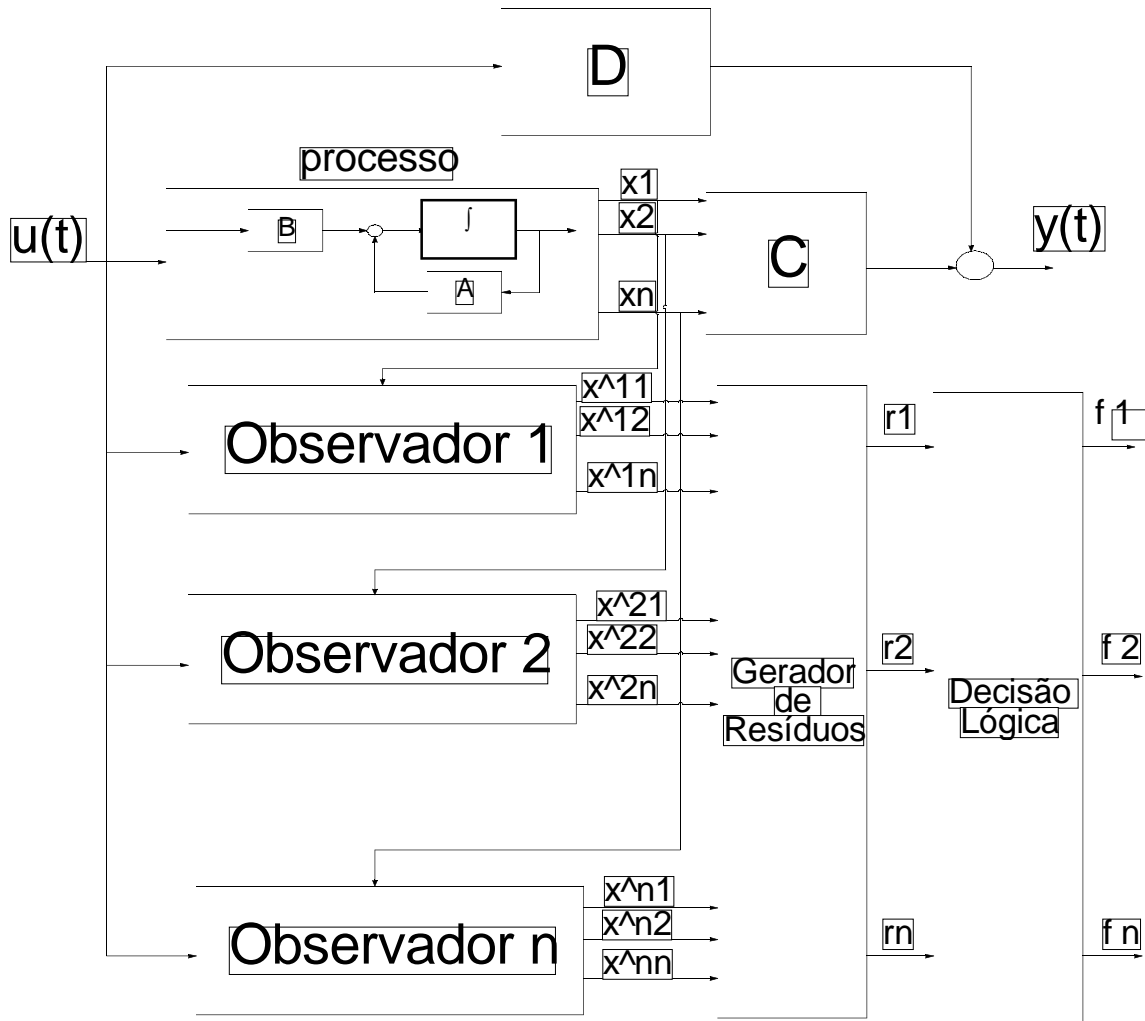


Figura-2.2 - Diagrama do esquema do observador dedicado

Considerando o modelo linear dinâmico do processo:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde \mathbf{x} é um vetor de estado de dimensão $n \times 1$; \mathbf{u} é um vetor de entrada de dimensão $p \times 1$; \mathbf{y} é um vetor de saída de dimensão $q \times 1$; \mathbf{A} é a matriz do sistema de dimensão $n \times n$; \mathbf{B} é uma matriz de entrada de dimensão $n \times p$; \mathbf{C} é uma matriz de saída de dimensão $q \times n$ e \mathbf{D} é uma matriz de dimensão $q \times q$. Se o sistema for não-linear, pode-se ajustar o modelo em torno de um ponto de operação a fim de que este modelo tenha as

características e a estrutura do modelo da equação 2.1. O processo deve ser observável usando cada instrumento individualmente, ou seja, para cada observador. Isto quer dizer que o projeto de observador exige que o par \mathbf{A} e \mathbf{c}_i seja observável, onde \mathbf{c}_i é a linha da matriz \mathbf{C} correspondente ao observador em questão. Esta condição nem sempre é satisfeita (Aguirre et al., 1996).

O primeiro passo é projetar o banco de observadores dedicados, tendo em cada observador a estimativa de um dos estados. Para cada instrumento, um observador é projetado. A expressão de um estado estimado será:

$$\hat{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{A} - \mathbf{h}_i \mathbf{c}_i) \hat{\mathbf{x}}_i + (\mathbf{B} - \mathbf{h}_i \mathbf{d}_i) \mathbf{u} + \mathbf{h}_i \mathbf{y}_i \quad (2.2)$$

onde $i=1,2,\dots,q$; as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} e o vetor \mathbf{u} foram definidos na equação 2.1; $\hat{\mathbf{x}}_i$ é o vetor de estados estimado; \mathbf{c}_i e \mathbf{d}_i são as i -ésimas linhas das matrizes \mathbf{C} e \mathbf{D} ; \mathbf{y}_i é a saída do i -ésimo instrumento; e \mathbf{h}_i é a i -ésima coluna da matriz de ganho do observador \mathbf{H} de dimensões $n \times q$.

Uma maneira de calcular os resíduos é a seguinte (Clark, 1989):

$$\begin{aligned} r_{i1} &= \left| \hat{x}_{i1} - \hat{x}_{i2} \right| \left| \hat{x}_{i1} - \hat{x}_{i3} \right| \left| \hat{x}_{i1} - \hat{x}_{iq} \right| \\ r_{i2} &= \left| \hat{x}_{i2} - \hat{x}_{i1} \right| \left| \hat{x}_{i2} - \hat{x}_{i3} \right| \left| \hat{x}_{i2} - \hat{x}_{iq} \right| \\ &\quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \\ r_{iq} &= \left| \hat{x}_{iq} - \hat{x}_{i1} \right| \left| \hat{x}_{iq} - \hat{x}_{i2} \right| \left| \hat{x}_{iq} - \hat{x}_{iq-1} \right| \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde $i=1,2,\dots,q$; \hat{x}_{ij} é o i -ésimo estado estimado pelo j -ésimo observador; r_{ij} é o resíduo referente ao i -ésimo estado estimado pelo j -ésimo observador. Há várias outras maneiras de se calcular resíduos, mas esta é uma das mais robustas (Clark, 1989). Esta forma de calcular resíduos é válida também para o esquema de observador dedicado (Pereira, 1996).

A figura 2.3 mostra o diagrama do esquema do observador generalizado.

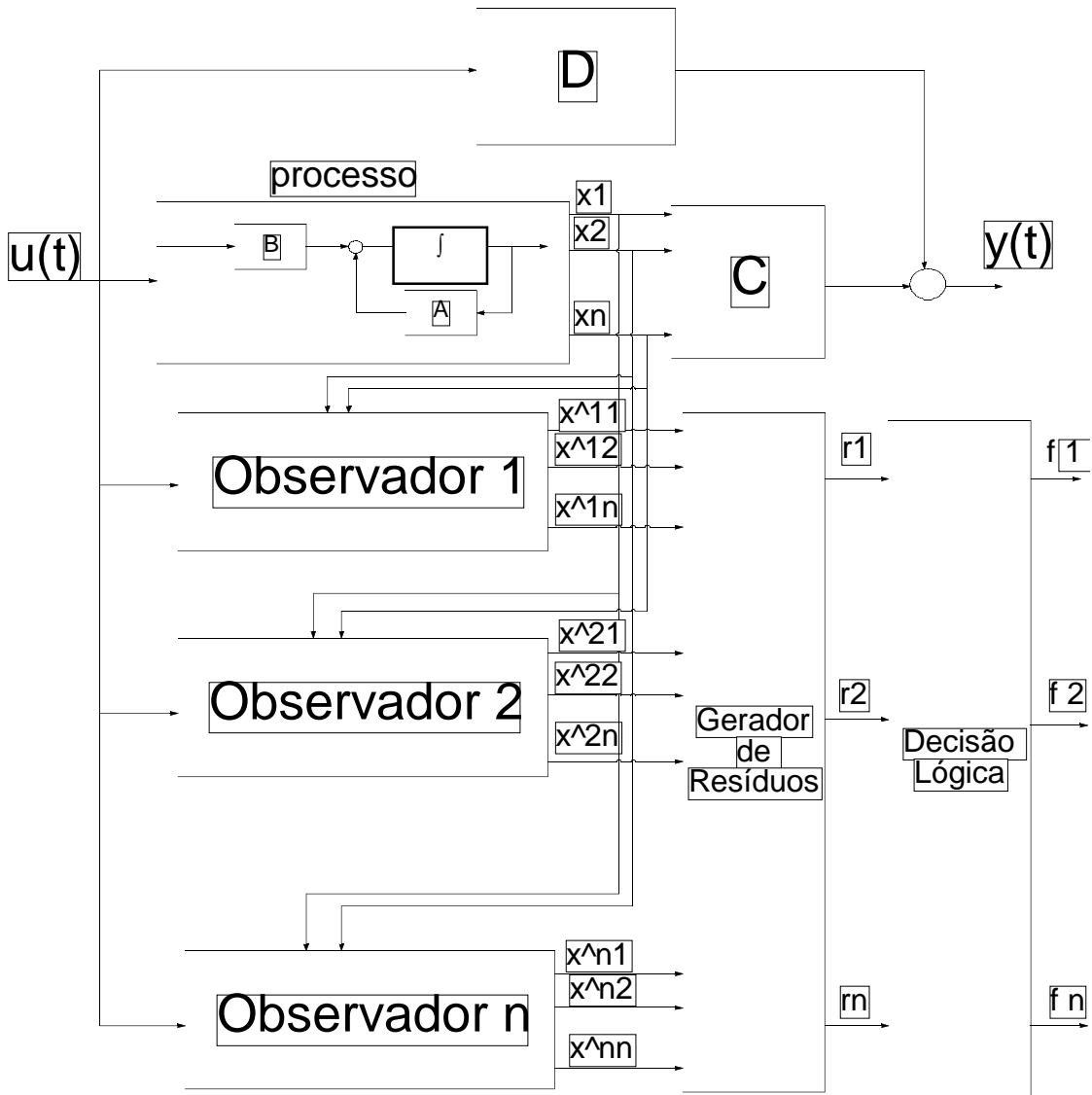


Figura-2.3 - Diagrama do esquema do observador generalizado.

2.3 - Métodos Baseados em Estimação de Parâmetros

Os modelos matemáticos podem ser constituídos de parâmetros matemáticos que contêm informações sobre parâmetros físicos do sistema, como por exemplo, resistência elétrica, massa, viscosidade, resistência hidráulica e outros (Isermann, 1984). Uma alternativa aos métodos baseados em observador, para os procedimentos de DIF, seria a estimação on-line dos parâmetros do processo que está sob supervisão, utilizando técnicas de estimação recursiva de parâmetros. Os parâmetros estimados são

comparados com os valores dos parâmetros físicos previamente levantados num determinado ponto de operação.

O algoritmo de DIF que utiliza estimação de parâmetros é implementado a partir dos sinais de entrada $-u(t)$ - e saída $-y(t)$ - do sistema. O processo pode estar operando em malha aberta ou malha fechada (Isermann, 1993). O modelo matemático que representa o sistema pode ser um modelo estático ou dinâmico. No caso de um modelo estático, a expressão que representaria o modelo poderia, por exemplo, ser da forma:

$$y(u) = \beta_0 + \beta_1 u + \beta_2 u^2 + K \quad (2.4)$$

Um modelo dinâmico, linearizado em torno de um ponto de operação e com parâmetros concentrados é normalmente representado por equações diferenciais lineares ordinárias do tipo:

$$\begin{aligned} y(t) + a_1 \frac{d}{dt} y(t) + a_2 \frac{d^2}{dt^2} y(t) + \dots + a_n \frac{d^n}{dt^n} y(t) = \\ = b_0 u(t) + b_1 \frac{d}{dt} u(t) + b_2 \frac{d^2}{dt^2} u(t) + \dots + b_m \frac{d^m}{dt^m} u(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Os vetores de parâmetros dos modelos de um processo qualquer para os casos estático e dinâmico são, respectivamente:

$$\begin{aligned} \theta_{estatico}^T &= [\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2 \ K] \\ \theta_{dinamico}^T &= [a_1 \ a_2 \ K \ a_n \ b_0 \ b_1 \ b_2 \ K \ b_m] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Estes parâmetros mostram, na maioria das vezes, de uma forma mais ou menos intrínseca, a relação entre os vários coeficientes físicos do processo (Isermann, 1984). Havendo falhas no processo estes parâmetros poderão variar, e tal informação pode, em princípio, ser utilizada para determinar o instante e o local da falha.

Se os coeficientes físicos que poderão indicar a ocorrência de falhas não forem diretamente mensuráveis, uma tentativa seria verificar suas variações através das variações dos parâmetros do modelo (Isermann, 1984). Sendo θ o vetor de parâmetros do modelo e ρ os parâmetros físicos do sistema, a seguinte relação é verdadeira:

$$\theta = f(\rho) \quad (2.7)$$

A estimação do vetor θ se dá através das relações dos dados de entrada e saída do sistema. Os parâmetros físicos do sistema podem ser determinados através da relação inversa:

$$\rho = f^{-1}(\theta), \tag{2.8}$$

se θ for conhecido e se f admitir inversa. A variação dos parâmetros físicos $\Delta\rho$ é a diferença entre o parâmetro físico estimado $\hat{\rho}$ e o valor do parâmetro físico aceito como normal ρ_{normal} para aquela condição de operação:

$$\Delta\rho = \hat{\rho} - \rho_{normal} \tag{2.9}$$

Baseado em $\Delta\rho$, o método de DIF empregado poderá informar onde e quando ocorreu uma falha.

O esquema da figura 2.4 ilustra este procedimento.

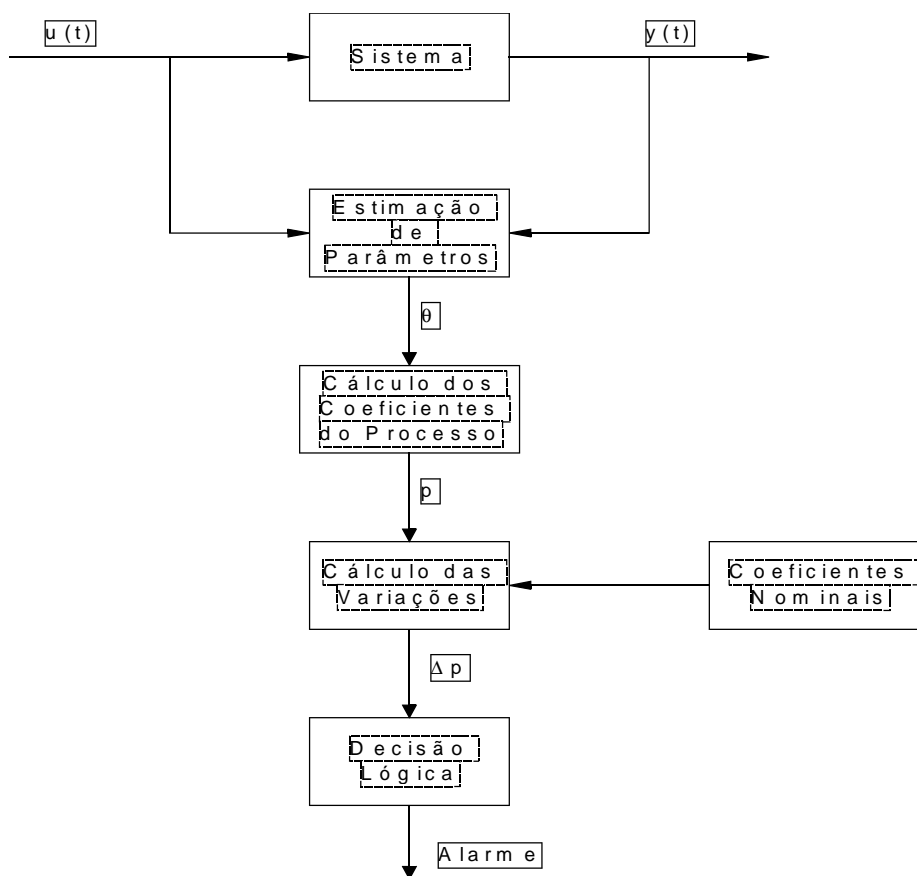


Figura-2.4 - Estimação de parâmetros em conjunto com modelagem matemática.

Deve-se tentar embutir no vetor de parâmetros θ o máximo possível de parâmetros com significado físico, a fim de conseguir monitorar o processo de forma direta. Esta técnica de estimação de parâmetros requer que se conheça a equação da relação inversa (2.8).

Para se utilizar algum método de estimação de parâmetros para modelos contínuos no tempo é necessário também que em primeiro lugar se faça uma modelagem matemática do processo, seja por meio de equações de balanço de energia, massa e momento, ou seja, através de leis que regem fenômenos físicos. Estes modelos serão da forma de equações diferenciais ordinárias ou parciais contínuas no tempo. Com isto, o vetor de parâmetros θ deverá ser estimado no domínio do tempo contínuo. Os métodos de estimação de parâmetros no tempo contínuo devem ser bastante robustos ao ruído, uma vez que estarão sendo calculadas derivadas de sinais (Young, 1981; Isermann, 1984, 1993).

O assunto desta dissertação será a implementação de um método de DIF utilizando estimação de parâmetros em tempo contínuo. Mais detalhes sobre o método matemático empregado serão descritos no capítulo 4.

2.4 - Métodos de DIF Baseados no Conhecimento

Os métodos baseados no conhecimento complementam os métodos de DIF. O termo *conhecimento* se refere à experiência que um ser humano tem em um determinado processo. Este método é normalmente utilizado quando o comportamento do sistema obedece a uma regra empírica. Esta é uma boa alternativa para auxiliar os métodos de DIF que monitoram processos muito complexos, em que não há uma maneira conhecida de modelar matematicamente o processo (Tzafestas, 1989; Frank, 1990). Enquanto os algoritmos matemáticos utilizam modelos analíticos quantitativos, o método de DIF baseado no conhecimento utiliza modelos lingüísticos qualitativos. Na prática os métodos de DIF baseados no conhecimento aparecem frequentemente em conjunto com outros métodos matemáticos, complementando as lacunas deixadas por tais métodos.

Um método de DIF baseado no conhecimento possui as seguintes etapas (Frank & Seliger, 1991):

1. o conhecimento básico (conhecimento sobre as regras de funcionamento do processo);
2. os dados (informação sobre as características momentâneas do processo);

3. a conclusão baseada no raciocínio;
4. a informação (dizer se há ou não falhas no processo).

Por ser um método empírico, sua implementação irá variar de processo para processo. Maiores detalhes podem ser obtidos em (Tzafestas, 1989; Frank, 1990).

2.5 - Comentários Finais

Foram apresentados neste capítulo, alguns métodos utilizados para detecção e isolação de falhas. Optou-se por descrever métodos baseados em observadores de estado por já terem sido usados no STI com a finalidade de detectar e isolar falhas (Pereira, 1996; Aguirre et al., 1996). Outros trabalhos com intuito de detectar e isolar falhas utilizando observadores de estado pode ser obtidos em (Frank & Wünnenberg, 1989; Patton & Kangethe, 1989; Marquez & Diduch, 1992; Frank & Koppen, 1993; Frank, 1994; Medvedev, 1996).

O método de estimação de parâmetros foi citado com a finalidade de dar uma noção introdutória ao leitor sobre a idéia básica deste trabalho que é a estimação de parâmetros visando a detecção e isolação de falhas.

Muitos outros métodos podem ser encontrados na literatura: métodos baseados no domínio da frequência (Frank, 1990; Frank & Seliger, 1991; Frank & Ding, 1993, 1994; Frank et al., 1994); métodos baseados em redes neurais (Naidu et al., 1990; Leonard & Kramer, 1991; Sorsa & Koivo, 1993); métodos baseados em espaço de paridade (Frank, 1990; Frank & Seliger, 1991; Ray & Luck, 1991); entre outros (Gertler & Singer, 1990; Hassan et al., 1992; Korbicz et al., 1993; Patton & Chen, 1993; Park et al., 1994; Zhang et al., 1994).

No capítulo seguinte é apresentado o modelo matemático do STI, cuja planta foi utilizada para a implementação do método de DIF desenvolvido neste trabalho.

3 *Modelagem Matemática do Sistema de Tanques Interativos*

3.1 - Introdução

O Sistema de Tanques Interativos (STI), localizado no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (CPDEE), é uma planta piloto que tem algumas características comuns a plantas industriais. Mesmo construída em escala reduzida, esta planta possui atuadores, sensores e *hardware* semelhantes em alguns aspectos aos que são utilizados em plantas reais. O objetivo de sua construção foi o de que nela pudessem ser realizados testes de métodos de controle e monitoração desenvolvidos no CPDEE, antes de serem implementados numa planta industrial real (Abreu, 1993; Braga, 1994; Polito, 1995). O fluido utilizado no processo é água comum. A figura 3.1 mostra uma foto do STI.

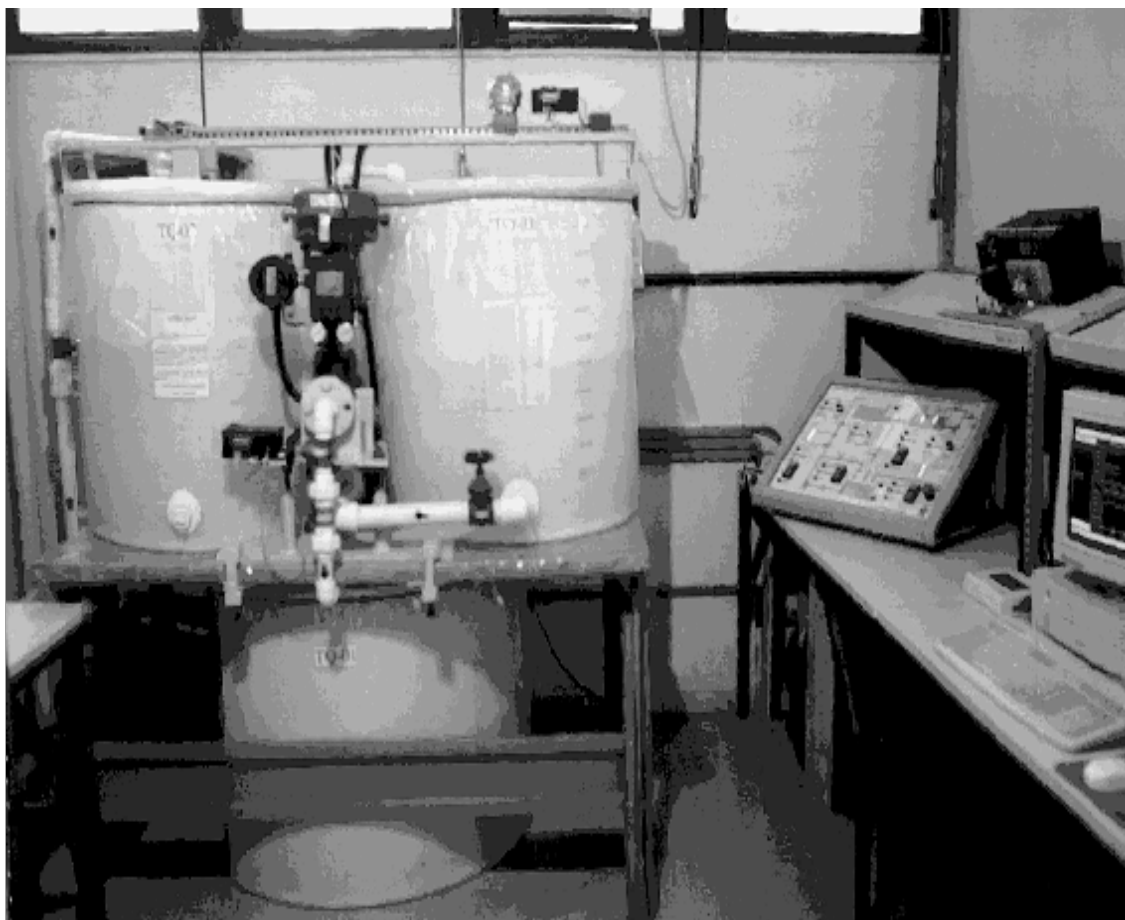


Figura-3.1 - Foto do Sistema de Tanques Interativos (Braga, 1994).

No Apêndice A, encontram-se informações sobre: a estrutura do *hardware* utilizado no STI, os componentes da planta, e a instrumentação envolvida no processo. Maiores detalhes sobre o STI podem ser encontrados em (Abreu, 1993; Braga, 1994; Polito, 1995).

Este capítulo está dividido do seguinte modo: a primeira parte descreve o princípio de funcionamento do STI; a segunda parte descreve o modelo matemático do processo em condições normais de operação; e a terceira, o modelo matemático que inclui algumas falhas possíveis de serem implementadas na planta sem que haja qualquer dano físico ao processo. Maiores detalhes sobre a modelagem do sistema de tanques interativos podem ser encontrados em (Abreu, 1993; Braga, 1994) para funcionamento sem falhas e (Pereira, 1996) para o caso com falhas. Detalhes sobre o controlador PID utilizado no processo podem ser obtidos em (Braga, 1994).

3.2 - Princípio de Funcionamento da Planta

A água circula entre os tanques da seguinte forma (ver figura 3.2):

- de TQ-01 para TQ-02: a água é bombeada por BA-01;
- de TQ-02 para TQ-03: a água flui pelo princípio dos vasos comunicantes;
- de TQ-03 para TQ-01: a água é bombeada por BA-02, fechando-se o ciclo.

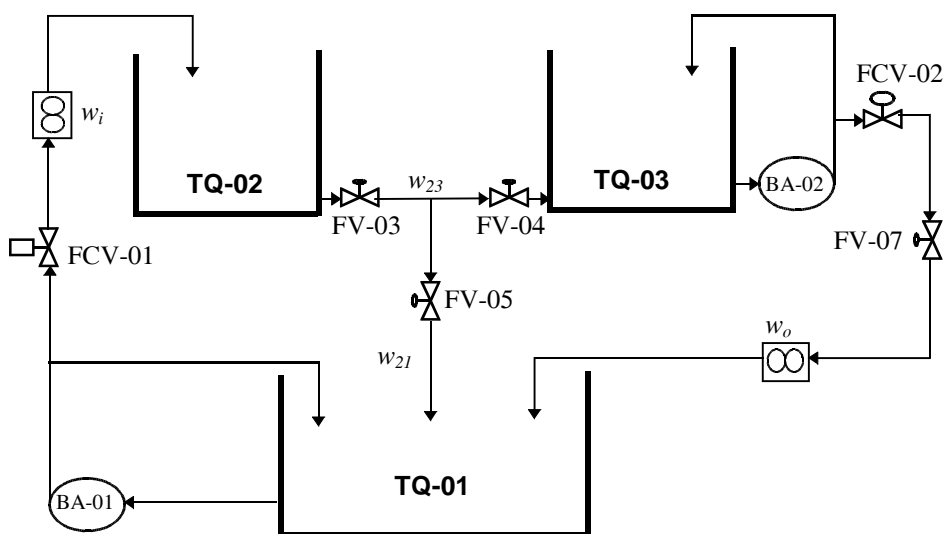


Figura-3.2 - Esquema de funcionamento do STI (Pereira, 1996).

As variáveis controladas da planta são: o nível de TQ-03 e a vazão de saída de TQ-03. O controle do nível de TQ-03 é feito de forma indireta através da abertura ou fechamento da válvula pneumática FCV-01, que regula a vazão de entrada de TQ-02. É necessário a atuação na válvula FCV-01 para regular a vazão entre TQ-01 e TQ-02 pois a bomba BA-01 é de velocidade constante, não sendo possível atuar diretamente nesta bomba. A válvula pneumática FCV-02 executa diretamente o controle da vazão de saída de TQ-03, pois a bomba BA-02 é também de velocidade constante.

O controle da planta é realizado com base nas informações fornecidas pelo sensor de nível LE-01 (nível de TQ-03) e o sensor de vazão FE-02 (vazão de saída de TQ-03), tendo o sensor de vazão FE-01 (vazão de entrada de TQ-02) a função apenas de monitoração.

3.3 - Modelo Matemático do STI

O modelo matemático de um processo é de grande importância no desenvolvimento de alguns algoritmos de controle e monitoração. Com ele pode-se fazer simulações do processo para se obter respostas a diferentes entradas, testar a sintonia de controladores e estudar o comportamento do sistema em diferentes pontos de operação (Pena, 1983).

Na Detecção e Isolação de Falhas (DIF), é muito importante também o uso de um modelo matemático que reproduza bem o comportamento do sistema nas diferentes condições de operação. Este modelo pode ser contínuo ou discreto, linear ou não-linear (Frank & Seliger, 1991). Uma das principais formas de se obter um modelo matemático é se basear na física do processo, onde as equações matemáticas são derivadas a partir de princípios e leis da Física. Esta será a forma utilizada neste trabalho para se obter o modelo matemático do sistema de tanques interativos. Este modelo será útil para se estabelecer como e quais os parâmetros físicos que serão estimados, além de ser utilizado para a realização de simulações da planta.

O modelo matemático dinâmico do STI, baseado nas leis da Física, em condições normais de operação (ou seja, sem falhas), pode ser obtido pelas equações de balanço de massa dos tanques TQ-02 e TQ-03 (Abreu, 1993; Braga, 1994; Polito, 1995 e Pereira, 1996):

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (3.1) \\ & \dots & (b) \end{aligned}$$

onde m_2 e m_3 são respectivamente, as massas de água armazenadas em TQ-02 e TQ-03 em kg; w_i é a vazão de massa na entrada de TQ-02 em kg/s; w_{23} é a vazão de massa entre os tanques TQ-02 e TQ-03 em kg/s; e w_o é a vazão de massa na saída de TQ-03 em kg/s (ver figura-3.2).

Sendo as áreas dos tanques constantes e iguais (A) em m^2 , e considerando a densidade da água (ρ) em kg/m^3 constante, tem-se que:

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (3.2) \\ & \dots & (b) \end{aligned}$$

onde h_2 e h_3 são os níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03 em metros, respectivamente.

As equações (3.1.a) e (3.1.b) podem ser rescritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (b) \end{aligned} \tag{3.3}$$

Sabendo-se que a vazão de massa (w) em kg/s é o produto da vazão volumétrica (q) em m³/s pela densidade de massa (ρ) em kg/m³, tem-se que:

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (b) \\ & \dots & (c) \end{aligned} \tag{3.4}$$

onde q_i é a vazão volumétrica na entrada do tanque TQ-02; q_{23} é a vazão volumétrica entre os tanques TQ-02 e TQ-03; e q_o é a vazão volumétrica na saída de TQ-03.

As expressões (3.3.a) e (3.3.b) podem ser rescritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (b) \end{aligned} \tag{3.5}$$

É importante notar que a vazão q_o na expressão (3.5.b) não depende do nível de TQ-03. Isto ocorre porque a bomba BA-02 faz com que haja um desacoplamento entre a vazão q_o e o nível h_3 .

As vazões q_i , q_{23} e q_o podem ser obtidas do seguinte modo:

- vazões q_i e q_o : através de um polinômio que ajuste a curva característica da respectiva válvula em função de seu sinal de controle (ver Apêndice A):

$$\begin{aligned} & \dots & (a) \\ & \dots & (b) \end{aligned} \tag{3.6}$$

- vazão q_{23} : segundo a lei de Bernoulli, a vazão entre os tanques TQ-02 e TQ-03 pode ser determinada através da queda de pressão em função da vazão sobre uma válvula (Seborg et al., 1989):

(3.7)

onde C_v é o coeficiente de vazão da tubulação entre TQ-02 e TQ-03; e P_2 e P_3 são as pressões nas extremidades da tubulação e que neste caso coincidem com as pressões no fundo dos tanques TQ-02 e TQ-03, respectivamente.

Assumindo a pressão atmosférica como P_{atm} e a aceleração da gravidade como g , P_2 e P_3 podem ser definidas assim:

(a)

;

(3.8)

.

(b)

Substituindo-se as expressões (3.8.a) e (3.8.b) na expressão (3.7) tem-se:

(3.9)

,

onde R pode ser definido como uma resistência hidráulica, ou seja:

(3.10)

.

A forma final de q_{23} é, portanto:

(3.11)

.

Substituindo as equações (3.6.a), (3.6.b) e (3.11) nas equações (3.5.a) e (3.5.b) tem-se a forma final do modelo:

(a)
(3.12)
(b)

onde \dot{h}_2 e \dot{h}_3 são as derivadas primeiras em relação ao tempo dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03 respectivamente; $Q_{i_{max}}$ e $Q_{o_{max}}$ são as vazões máximas de entrada em TQ-02 e de saída em TQ-03 respectivamente; $q_{ipol}(u_1)$ e $q_{opol}(u_2)$ são os polinômios que ajustam a curva característica das válvulas FCV-01 e FCV-02, normalizados, respectivamente; u_1 e u_2 são os sinais de controle que vão para as válvulas FCV-01 e FCV-02, respectivamente. Estes sinais de controle variam entre 0 e 1, sendo que zero indica que a válvula estará totalmente fechada e 1 totalmente aberta.

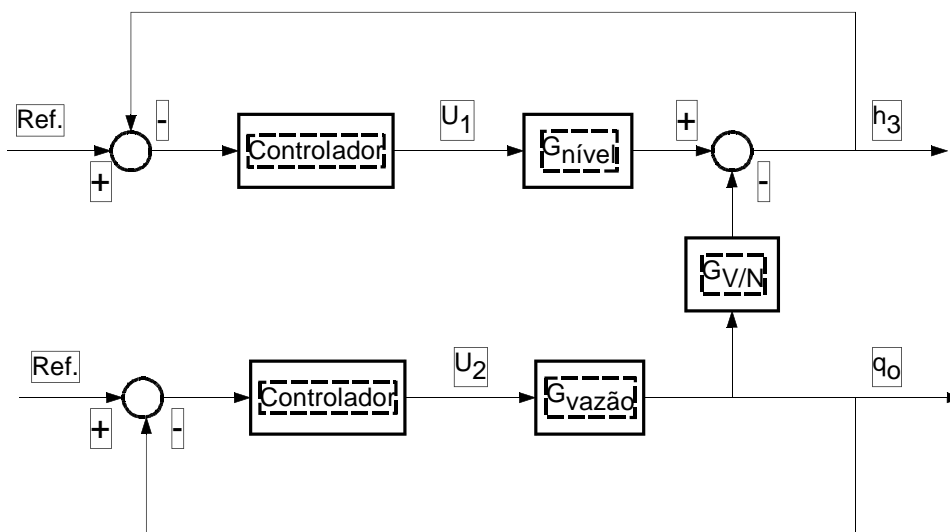


Figura-3.3 - Diagrama de blocos do sistema de controle do STI.

A figura 3.3 mostra o diagrama de blocos da estratégia de controle do STI, onde $G_{nível}$ é a função de transferência que relaciona U_1 com h_3 , $G_{vazão}$ é a função de transferência que relaciona U_2 com q_o , e $G_{V/N}$ é a função de transferência que relaciona q_o com h_3 . Pode-se notar o acoplamento entre as malhas de vazão e de nível, sendo que a malha de vazão não sofre influência da malha de nível.

3.4 - Modelo matemático de falhas para o STI

O modelo descrito na seção 3.3 foi desenvolvido para as condições normais de funcionamento, ou seja, sem ocorrência de nenhuma falha no processo (Braga, 1994). Um modelo matemático para o sistema de tanques interativos contendo algumas falhas possíveis de serem implementadas na planta foi desenvolvido e validado em (Pereira, 1996). A apresentação e uma descrição breve do modelo de falhas se fazem necessárias, uma vez que este modelo será utilizado para simulações do processo na situação de falha, tendo como objetivo estudar e ajustar o algoritmo de detecção e isolamento de falhas que será utilizado no processo real.

Este modelo descreve algumas das falhas que podem ser realizadas na prática sem que nenhum componente do sistema seja danificado. É importante salientar que existem inúmeras falhas possíveis de serem modeladas, mas o modelo irá conter apenas as falhas que serão executadas na prática para os testes de detecção e isolamento de falhas. A escolha de tais falhas foi feita baseando-se na facilidade com que tais falhas podem ser implementadas sem causar danos à planta. Informações complementares e a validação do modelo podem ser obtidas em (Pereira, 1996).

As falhas implementadas no modelo matemático podem ser classificadas em três grupos:

- falhas no processo: são as falhas que afetam a dinâmica da planta, tais como entupimentos e vazamentos;
- falhas nos sensores: são as falhas que interferem na informação enviada ao controlador do processo. Estas falhas podem ser, por exemplo, uma descalibração de um instrumento de medida ou a perda total da informação de um sensor devido a uma desconexão de algum elemento transmissor do sinal medido;
- falhas nos atuadores: são as falhas que impedem a ação correta de um atuador, como por exemplo o agarramento de uma válvula.

3.4.1 - Falhas no processo

3.4.1.1 - Vazamento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03

Esta falha é possível de ser realizada na prática devido à presença de válvula FV-05 (ver figura 3.2). Abrindo-se esta válvula, pode-se implementar um vazamento no duto entre TQ-02 e TQ-03.

O modelo matemático desta falha considera que a vazão na válvula FV-05 é composta por uma parte da vazão com origem em TQ-02 e outra com origem em TQ-03 (Pereira, 1996). A vazão referente a cada tanque será:

$$\begin{aligned} & \text{(a)} \\ & \qquad \qquad \qquad ; \qquad \qquad \qquad \text{(3.13)} \\ & \text{(b)} \end{aligned}$$

onde q_2 é a parte da vazão referente ao tanque TQ-02; q_3 é a parte da vazão referente ao tanque TQ-03; h_2 é o nível do tanque TQ-02; h_3 é o nível do tanque TQ-03; $R_{hv_{21}}$ é a resistência hidráulica mínima de vazamento entre TQ-02 e TQ-01; e $R_{hv_{31}}$ é a resistência hidráulica mínima de vazamento entre TQ-03 e TQ-01.

As equações dinâmicas ficam da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{(a)} \\ & \qquad \qquad \qquad \text{(3.14)} \\ & \text{(b)} \end{aligned}$$

onde kv_{23} é um número entre 0 e 1, e representa a grandeza do vazamento (zero significa ausência de vazamento e quanto maior kv_{23} , maior o vazamento).

3.4.1.2 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03

As válvulas FV-03 e FV-04 tornam possível a realização deste entupimento, bastando-se para isto o fechamento parcial ou total de uma delas (ver figura 3.2). O modelo matemático desta falha inclui o termo multiplicado à vazão entre os dois tanques.

O modelo funciona como se a resistência hidráulica entre os tanques (Rh) fosse aumentada.

As equações dinâmicas ficam da seguinte forma:

$$(a) \tag{3.15}$$

$$(b)$$

com k_{e23} , sendo k_{e23} um número entre 0 e 1 que representa o termo de redução da vazão em consequência do entupimento e k_{e23} é também um número entre 0 e 1 onde zero representa a ausência do entupimento e quanto maior k_{e23} , maior o entupimento.

3.4.1.3 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-01 e TQ-02

Esta falha pode ser realizada através da válvula FV-01 ou através da válvula FV-AQ de regulagem de entrada de AQ-01 (esta válvula não está relacionada no fluxograma da figura 3.2). Um entupimento total não seria possível de se realizar na planta, pois a bomba BA-01 funciona continuamente e haverá sobrecarga se o fechamento da válvula FV-01 for total, danificando a bomba. Este entupimento será executado na prática apenas parcialmente.

Esta falha é modelada reduzindo-se a vazão máxima de entrada de TQ-02 (Qi_{max}). As equações dinâmicas ficam da seguinte forma:

$$(a) \tag{3.16}$$

$$(b)$$

onde k_{e12} é um número entre 0 e 1 que representa o termo de redução da vazão por razão do entupimento; k_{e12} é também um número entre 0 e 1 onde o valor zero representa a ausência do entupimento e quanto maior k_{e12} , maior o entupimento.

Um entupimento no duto entre TQ-01 e TQ-02 faria com que a curva característica da válvula FCV-01 se alterasse, com isso a equação da válvula não seria mais válida. Para efeitos de simulação, este modelo se comporta de forma aceitável (Pereira, 1996).

3.4.1.4 - Entupimento no duto entre os tanques TQ-03 e TQ-01

Este entupimento pode ser executado na planta através do fechamento da válvula FV-07 (ver figura 3.2). O modelo matemático desta falha irá incluir o termo para representar a redução na vazão de saída do tanque TQ-02.

As equações matemáticas ficam assim:

$$(a) \quad (3.17)$$

$$(b)$$

com onde k_{e31} é um número entre 0 e 1 que representa o termo de redução da vazão por razão deste entupimento, k_{e31} é também um número entre 0 e 1 onde o valor zero representa a ausência do entupimento, e quanto maior k_{e31} maior o entupimento.

Os comentários sobre a alteração da curva característica da válvula feitos no item (3.4.1.3) são válidos para este caso também.

3.4.2 - Falhas nos sensores

As falhas nos sensores podem ser bruscas ou lentas, sendo as lentas muito mais difíceis de serem detectadas. As falhas bruscas modeladas são a perda total da informação do sinal medido, podendo ser, por exemplo, devido a uma interrupção da transmissão do sinal para o CLP, que pode ser implementada na planta pela desconecção do fio condutor do sinal junto ao CLP. Para o sensor de nível, esta perda de sinal pode ser também devido à desconecção do tubo de ar da cápsula da célula de carga, enquanto que, no caso específico dos sensores de vazão, esta perda de sinal pode também ser decorrente do agarramento das palhetas do medidor (Pereira, 1996).

No modelo matemático, a simulação desta falha é realizada levando-se os valores de nível e vazão a zero e mantendo-os neste valor.

3.4.3 - Falhas nos atuadores

3.4.3.1 - Falha na válvula de entrada FCV-01

É considerada falha na válvula FCV-01 o seu agarramento numa determinada posição, não respondendo mais aos sinais de comando do controlador. Para que esta falha seja implementada na planta, o comando da válvula deve ficar no modo manual. O operador, via painel de operação, fixa a abertura da válvula. No modelo matemático, esta falha é implementada fixando-se a vazão num determinado valor, independente de seu sinal de controle.

As equações do modelo matemático ficam assim:

$$(a) \quad (3.18)$$

$$(b)$$

com onde k_{cv01} é igual a 0 ou 1, sendo k_{cv01} igual a zero para situação normal de funcionamento e k_{cv01} igual a um para a condição de falha; q_{fa1} é a vazão na qual ocorreu o agarramento da válvula de entrada FCV-01.

3.4.3.2 - Falha na válvula de saída FCV-02

Esta falha é implementada tanto na planta quanto no modelo de modo análogo à falha na válvula de entrada FCV-01 (ver item 3.4.3.1).

As equações dinâmicas para este caso ficam da seguinte forma:

$$(a) \quad (3.19)$$

$$(b)$$

com onde k_{cv02} é igual a 0 ou 1, sendo k_{cv02} igual a zero para situação normal de funcionamento e k_{cv02} igual a um para a condição de falha, q_{fa2} é a vazão na qual ocorreu o agarramento da válvula de saída FCV-02.

3.4.3.3 - Falha na bomba de entrada BA-01

A interrupção completa do funcionamento da bomba BA-01 é a falha que será modelada neste item. Esta falha pode ocorrer tanto por um defeito elétrico quanto mecânico. Esta falha é implementada desligando-se a bomba no painel de operação. A desaceleração da bomba no momento em que ocorre a falha não será considerada por esta ter uma dinâmica muito rápida em relação ao intervalo de amostragem¹ utilizado. O modelo matemático desta falha faz com que a vazão de entrada seja igual a zero.

As equações dinâmicas do modelo matemático são as seguintes:

$$(a) \quad (3.20)$$

$$(b)$$

com onde k_{ba01} é igual a 0 ou 1, sendo k_{ba01} igual a zero para situação normal de funcionamento e k_{ba01} igual a 1 para condição de falha.

3.4.3.4 - Falha na bomba de saída BA-02

Esta falha é implementada na planta de forma análoga à falha na bomba de entrada BA-01. O mesmo procedimento é válido. Quanto ao comportamento do sistema após a ocorrência da falha há uma importante diferença: a vazão de saída de TQ-02, no caso de falha na bomba BA-02, pode não ser nula se o nível de TQ-02 estiver acima do ponto de tomada de água da bomba BA-02. Neste caso haverá uma vazão até que os dois níveis se igualem.

As equações do modelo matemático ficam da seguinte forma:

$$(a) \quad (3.21)$$

$$(b)$$

¹Ver seção 4.4.1.

com k_{ba02} , onde k_{ba02} é igual a 0 ou 1, sendo k_{ba02} igual a zero para situação normal de funcionamento e k_{ba02} igual a 1 para a condição de falha; Rh_{31} é a resistência hidráulica entre os tanques TQ-03 e TQ-01; h_{cv02} é a altura da válvula FCV-02; R_2 é o alcance da válvula FCV-02 e representa a razão entre as vazões máxima e mínima controláveis (Shinsky, 1988) sendo R_2 igual a 10 (Pereira, 1996); e k_{hba02} é igual a:

$$(3.22)$$

3.4.4 - Modelo geral contendo todas as falhas modeladas

As equações (3.23.a - 3.23.f) representam o modelo matemático do sistema de tanques interativos contendo todas as falhas modeladas. Além de facilitar as simulações, estas equações possibilitam a simulação de falhas simultâneas.

$$(3.23.a)$$

$$(3.23.b)$$

$$(3.23.c)$$

$$(3.23.d)$$

$$(3.23.e)$$

$$(3.23.f)$$

onde ξ_1 , ξ_2 e ξ_3 são variáveis aleatórias de distribuição uniforme, média nula e amplitude máxima $a_1 = 0,075\%$, $a_2 = 0,25\%$ e $a_3 = 0,5\%$, respectivamente, incluídas no modelo para simular o efeito do ruído observado na planta piloto (Pereira, 1996); e:

- k_{fh2} - constante que indica se há falha no sensor de nível LE-02, sendo zero para ausência de falha e 1 para ocorrência de falha, com $k_{fh2} = 1 - k_{fh2}$ (o sensor de nível de TQ-02, LE-02, foi instalado para a detecção e isolamento de falhas; os comentários sobre a necessidade desta instalação se encontram no capítulo 4);

- k_{fn3} - constante que indica se há falha no sensor de nível LE-01, sendo zero para ausência de falha e 1 para ocorrência de falha, com $k_{fn3} = 1 - k_{fn3}$;
- k_{fqo} - constante que indica se há falha no sensor de vazão FE-02, sendo zero para ausência de falha e 1 para ocorrência de falha, com $k_{fqo} = 1 - k_{fqo}$;
- k_{fqi} - constante que indica se há falha no sensor de vazão FE-01, sendo zero para ausência de falha e 1 para ocorrência de falha, com $k_{fqi} = 1 - k_{fqi}$.
- k_{h2} - constante que indica se a bomba BA-01 está desligada em função de sobre-nível de TQ-02, com $k_{h2} = 1 - k_{h2}$, sendo:

3.5 - Comentários Finais

O modelo matemático do STI será utilizado nos capítulos seguintes com a finalidade de estimação de parâmetros. Este modelo matemático já foi utilizado em outros trabalhos e apresentou bons resultados (Abreu, 1993; Braga, 1994; Polito, 1995; Pereira, 1996). O modelo matemático do STI para o caso de falhas será utilizado com o objetivo de se fazer alguns ajustes preliminares no algoritmo de detecção e isolamento de falhas desenvolvido neste trabalho. Os primeiros resultados das simulações utilizando estes modelos matemáticos foram apresentados em (Camargo & Aguirre, 1996).

No capítulo seguinte será apresentado o algoritmo de estimação de parâmetros ajustado para o STI. Os modelos matemáticos descritos neste capítulo atual foram utilizados na fase de testes e ajustes do algoritmo de estimação de parâmetros.

4 *Estimação Recursiva de Parâmetros no Sistema de Tanques Interativos*

4.1 - Introdução

Um sistema dinâmico contínuo no tempo pode ser satisfatoriamente aproximado por um modelo matemático dinâmico discreto, mas isto nem sempre é a melhor maneira de descrever o comportamento dinâmico deste sistema. Nos modelos matemáticos contínuos no tempo, muitas características físicas do sistema podem ser obtidas com certa facilidade através de alguns parâmetros estimados (Young, 1981; Isermann, 1984, 1992, 1993). Nos modelos matemáticos discretos, a obtenção destas características não é tão óbvia assim. Entretanto, a utilização dos modelos matemáticos contínuos no tempo é restrita devido às dificuldades de se utilizar valores de derivadas do processo, quando estas não se encontram disponíveis para leitura, o que normalmente é o caso (Tsang & Billings, 1994).

O capítulo anterior descreveu a modelagem matemática do Sistema de Tanques Interativos (STI) juntamente com seu princípio de funcionamento. Foi apresentado também um modelo matemático contendo algumas falhas possíveis de serem implementadas no processo real. Neste capítulo é apresentado um método para realizar a estimação recursiva de parâmetros no STI utilizando um modelo matemático contínuo no tempo. É implementado um algoritmo de mínimos quadrados recursivo para modelos contínuos no tempo utilizando dados amostrados (Young, 1981). Este algoritmo requer

valores de derivadas para a realização da estimação dos parâmetros. No STI, as derivadas dos níveis não são diretamente medidas (ver Capítulo 3 e Apêndice A), tornando-se necessário a estimação destas derivadas. Sabe-se que quando o sinal é ruidoso, o cálculo das derivadas é bastante distorcido. Um método para se resolver este problema é o emprego do Filtro de Variáveis de Estado, que também é apresentado neste capítulo. E por fim, são apresentados também, alguns procedimentos específicos adotados para tentar evitar a polarização dos parâmetros, como por exemplo a inclusão de termos de erro entre os regressores.

4.2 - Mínimos Quadrados Recursivo

O método de Mínimos Quadrados Recursivo utilizado para a estimação de parâmetros do STI é do tipo CD (modelo contínuo com estimação discreta)¹. A escolha de um modelo contínuo se deve ao fato de podermos estimar parâmetros do processo que tenham um certo significado físico (para maiores detalhes, ver Capítulo 2). Já a estimação discreta foi a escolhida porque a aquisição de dados do processo é feita via computador, de forma amostrada (ver Apêndice A). A estimação de parâmetros para modelos contínuos no tempo tem sido pouco utilizada devido à relativa facilidade que se tem em trabalhar com modelos discretos no tempo e à inerente dificuldade de medir/estimar derivadas de sinais medidos (Young, 1981; Isermann, 1993). Com isso o corpo literário referente à estimação de parâmetros para modelos contínuos no tempo ainda é relativamente pequeno. Um algoritmo proposto por Young (1981) é descrito a seguir.

Este algoritmo se aplica a sistemas dinâmicos que podem ser representados por modelos matemáticos com parâmetros concentrados em forma de equações diferenciais ordinárias. Um sistema dinâmico qualquer pode ser representado da seguinte forma:

(4.1)

onde $x(t)$ é um vetor n dimensional que caracteriza as variáveis de estado do sistema dinâmico; $u(t)$ é um vetor m dimensional que representa as entradas do sistema e são

¹Outros tipos de algoritmos de estimação de parâmetros são apresentados por Young (1981).

consideradas mensuráveis; $\theta(t)$ é o vetor r dimensional dos parâmetros do sistema que serão estimados; $w(t)$ é o vetor l dimensional das entradas distúrbio que afetam o sistema e que não são mensuráveis; $y(t)$ é o vetor p dimensional das saídas do sistema; e $v(t)$ é o vetor q dimensional representando os ruídos de medição. As funções f e g são normalmente não-lineares e, às vezes, variantes no tempo, o que indica que o sistema pode ser dinamicamente não-linear e não-estacionário. Para o propósito de estimação de parâmetros, estas funções serão consideradas constantes no tempo. O vetor de parâmetros $\theta(t)$ é também variante no tempo. Seu comportamento será monitorado e analisado tendo como objetivo detectar alguma perturbação que possa caracterizar uma falha no processo.

Com relação à equação 4.1, na prática normalmente se assume que $w(t)$ e $v(t)$ tenham média zero e que não sejam correlacionados com $u(t)$. Assim, a equação 4.1 pode assumir a seguinte representação:

$$(4.2)$$

onde $x(t)$ foi escrito em termos de sua observação $y(t)$;

onde o sobrescrito significa a derivada no

tempo, ou seja ; com os coeficientes

a_i e b_i ($i=1,2,\dots,n$) relacionados a y e u do vetor , respectivamente; e e representando ruído possivelmente colorido.

O algoritmo de mínimos quadrados recursivo para estimação de parâmetros em tempo contínuo a partir de dados amostrados (Young, 1981) tem a seguinte forma:

$$(4.3)$$

onde é o vetor de parâmetros estimado de θ e k representa a iteração corrente do algoritmo; e $P(k)$ é a matriz de covariância dos parâmetros (Ho, 1962). Esta matriz é gerada por uma segunda equação recursiva:

$$(4.4)$$

Nota-se que pela equação 4.3 que são necessários os valores das derivadas de y até ordem n . Normalmente estas derivadas não são medidas na planta. Com a presença de ruído nas medições, o cálculo destas derivadas pode ficar bastante distorcido. Uma solução para melhorar este problema é apresentada a seguir, com o Filtro de Variáveis de Estado.

4.3 - Filtro de Variáveis de Estado

O Filtro de Variáveis de Estado (FVE) tem como objetivo, dado um sinal de entrada $q(t)$, fornecer as derivadas do sinal até uma determinada ordem $(m-1)$ como também o próprio sinal filtrado (Young, 1981; Tsang & Billings, 1993, 1994). São utilizados como parâmetros deste filtro os coeficientes do filtro de Butterworth para sistemas contínuos no tempo. É apresentada nesta seção a implementação digital do FVE (Tsang & Billings, 1994).

Seja um filtro de Butterworth para sistemas contínuos apresentado da seguinte forma (Millman & Halkias, 1981; Phillips & Nagle, 1995):

(4.5)

onde $Q(s)$ é o sinal de entrada a ser filtrado; $X(s)$ é o sinal filtrado; e $\gamma_i (i=0,1,2,\dots,m)$ são os coeficientes do filtro. A escolha da frequência de corte e os coeficientes do filtro são apresentados na seção 4.4.2 .

Rescrevendo a equação 4.5, no domínio do tempo, tem-se:

(4.6)

onde o sobrescrito denota a ordem da derivada, por exemplo,

Separando-se a derivada de maior ordem, tem-se:

(4.7)

A aproximação de Euler para as derivadas é (Johnson & Riess, 1982):

(4.8)

Com a intenção de explicitar a derivada de menor ordem em cada expressão do conjunto de equações (4.8), pode-se reescrever a derivada de maior ordem no instante t_{j-1} ao invés do instante t_j . Assim, o novo conjunto de equações é:

(4.9)

Fazendo:

(4.10)

;

(4.11)

De (4.7), (4.9), (4.10) e (4.11), tem-se:

(4.12)

A expressão 4.12 representa a implementação digital do FVE. A variável $q(t)$ é o sinal de entrada do filtro e pode ser tanto $y(t)$ quanto $u(t)$. O vetor $X(t)$ é o vetor de saídas do filtro e representa os estados de $x(t)$. O intervalo de amostragem ($t_j - t_{j-1}$) deve satisfazer o teorema da frequência de amostragem de Nyquist (Phillips & Nagle, 1995), e sua escolha é discutida na seção 4.4.1 .

A figura 4.1 mostra o diagrama de blocos do FVE.

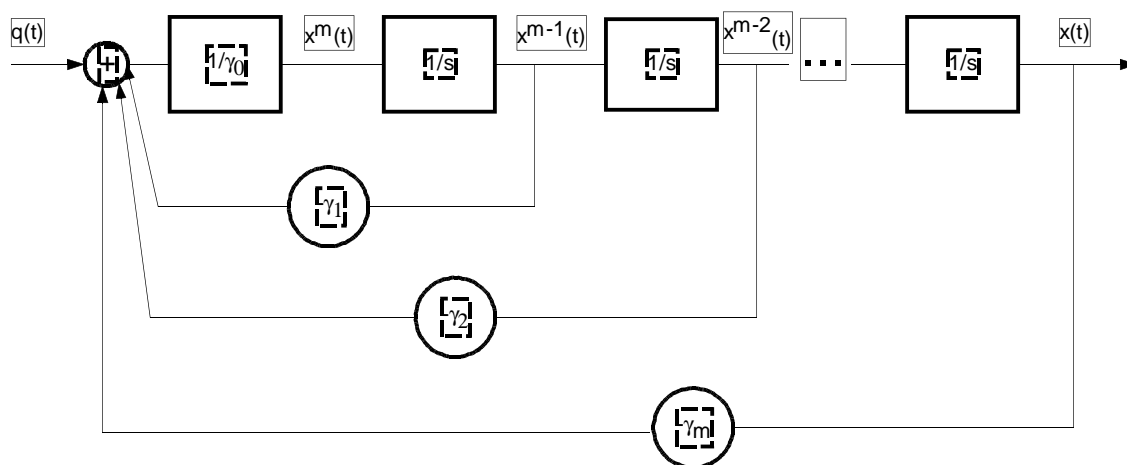


Figura-4.1 - Diagrama de blocos do Filtro de Variáveis de Estado.

4.4 - Metodologia Adotada para a Realização da Estimação Recursiva de Parâmetros no STI

4.4.1 - Intervalo de Amostragem

Para a realização do controle de nível do tanque TQ-03, o intervalo de amostragem para a leitura do nível, bem como para a atuação na válvula FCV-01, é de 15 segundos (Braga, 1994). Já o controle da vazão de saída do tanque TQ-03 requer um intervalo de amostragem de 2 segundos para a leitura da vazão e também para a atuação na válvula FCV-02 (Braga, 1994; Polito, 1995). Como o algoritmo de estimação de parâmetros trabalha com as malhas de nível e vazão simultaneamente, é necessário que o intervalo de amostragem para o algoritmo seja pelo menos menor ou igual a 2 segundos. Um

intervalo de amostragem maior que 2 segundos faz com que alguns dos sinais de controle para a atuação da válvula FCV-02 (vazão de saída de TQ-03) não sejam levados em conta para a estimação dos parâmetros, havendo uma perda de informação referente à malha de vazão. Valores muito menores que 2 segundos, por outro lado, poderiam resultar em super amostragem dos dados da malha de nível, acarretando com isto mal-condicionamento numérico no algoritmo de mínimos quadrados recursivo.

À medida que o intervalo de amostragem aumenta, as estimativas das derivadas dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03, no filtro de variáveis de estado, divergem mais e mais das derivadas reais², enquanto que a redução do intervalo de amostragem é prejudicial ao algoritmo de estimação de parâmetros. O intervalo de amostragem de 1 (um) segundo foi o escolhido por já ter sido usado numa aplicação semelhante (Pereira, 1996). Testes realizados mostraram que este intervalo é satisfatório. Este valor será utilizado tanto para aquisição de dados referentes à malha de nível quanto à malha de vazão, mantendo-se os respectivos controles com os intervalos de amostragem originais.

4.4.2 - Filtro de Variáveis de Estado (FVE) para o STI

Os parâmetros utilizados neste filtro de variáveis de estado são os parâmetros do filtro de Butterworth para sinais contínuos (Millman & Halkias, 1981; Kraus *et al.*, 1994; Phillips & Nagle, 1995). Sabe-se que quanto maior a ordem de um filtro, maior é o atraso de fase entre o sinal original e o sinal filtrado, provocando com isto um atraso de tempo maior entre os respectivos sinais. Para a detecção de falhas, é importante que o sinal filtrado tenha um menor atraso de tempo possível em relação ao sinal original para que se possa fazer a detecção de falhas de forma mais rápida.

Utilizou-se neste trabalho um filtro de segunda ordem, com frequência de corte de 0,2 rad/s. A escolha desta frequência de corte foi feita empiricamente após a realização de vários testes com o FVE utilizando sinais reais de nível medidos na planta. Para valores maiores que este, os sinais filtrados ainda continham uma parcela significativa de ruído, prejudicando o cálculo das derivadas. Para valores menores, aumenta o atraso de tempo entre o sinal filtrado e o sinal original. Adotou-se um meio termo.

O FVE para o sistema de tanques interativos é da seguinte forma³:

²Tomando-se como referência o cálculo de Euler para derivadas (Johnson & Riess, 1982) com um intervalo de amostragem bem menor que o intervalo utilizado para estimação de parâmetros (utilizou-se o valor de 0,1 segundo).

³Para maiores detalhes ver seção 4.3.

$$; \quad (4.13)$$

onde:

$$, \quad (4.14)$$

com $x(t)$ sendo o próprio sinal filtrado e $x^l(t)$ a derivada deste sinal, e:

$$; \quad (4.15)$$

onde γ_0 , γ_1 e γ_2 são os coeficientes do filtro de Butterworth. Utilizando-se a função BUTTER(ordem do filtro, frequência de corte) (Krauss *et al.*, 1994) do *software* MATLAB™ (MathWorks, 1990), encontra-se como parâmetros do filtro de Butterworth os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 25; \\ \gamma_1 &= \quad ; \\ \gamma_2 &= 1. \end{aligned}$$

O diagrama de Bode deste filtro é mostrado na figura 4.2.

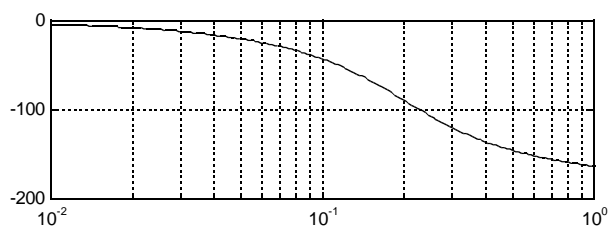


Figura-4.2 - Diagrama de Bode do Filtro de Variáveis de Estado

A figura 4.3 mostra, como exemplo, o sinal do medidor de nível do tanque TQ-03 com seu respectivo sinal filtrado para um teste qualquer realizado na planta. A figura 4.4 mostra a derivada, fornecida pelo FVE, do sinal da figura 4.3, com a respectiva derivada original. Como pode-se observar na figura 4.4, a derivada do sinal determinada diretamente pela aproximação de Euler é bastante distorcida.

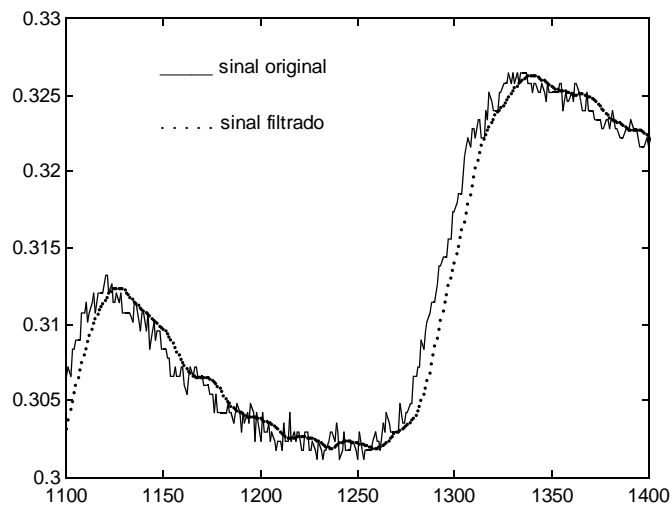


Figura-4.3 - Sinal de nível do tanque TQ-03 original com seu respectivo sinal filtrado.

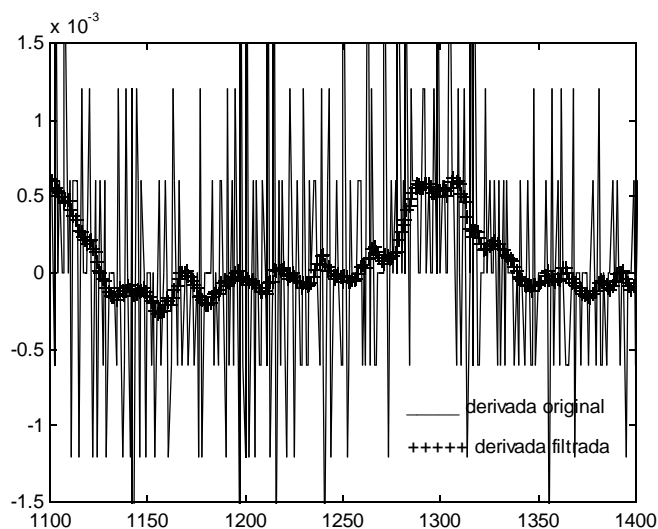


Figura-4.4 - Derivada original, calculada usando-se Euler, e derivada filtrada, determinada por FVE, do sinal de nível da figura 4.3.

Como pode-se observar na figura 4.3, o sinal filtrado tem um certo atraso de tempo em relação ao seu sinal original. Este atraso não é constante ao longo de uma operação. Para evitar problemas no algoritmo de estimação de parâmetros, o sinal de controle também será filtrado pelo mesmo filtro dos sinais de nível, com a finalidade de que os sinais de controle tenham um atraso de tempo próximo ao atraso dos sinais de nível.

A figura 4.5 mostra o diagrama de blocos do princípio de funcionamento do FVE acoplado ao Sistema de Tanques Interativos:

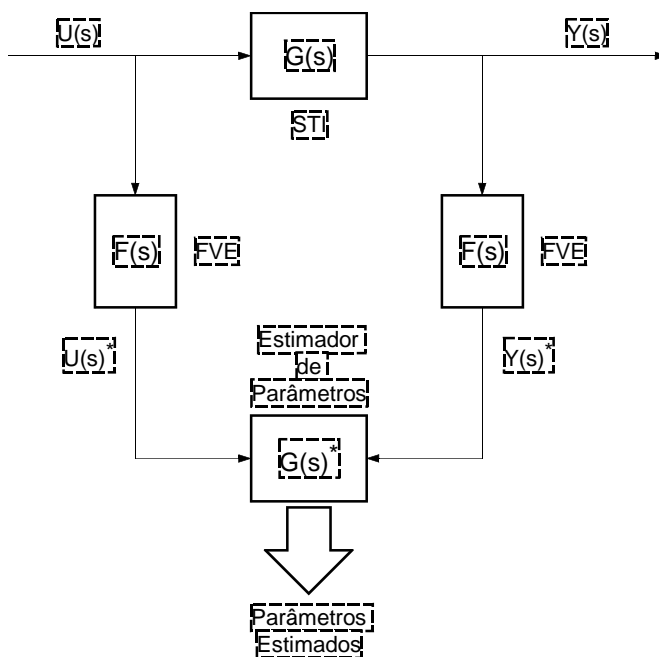


Figura-4.5 - Diagrama de blocos do FVE acoplado ao STI.

onde $U(s)$ representa os sinais de controle das válvulas FCV-01 e FCV-02; $Y(s)$ representa o sinal medido do nível do tanque TQ-03; e $G(s) = Y(s)/U(s)$. Os sinais filtrados são $U(s)^*$ e $Y(s)^*$; $G(s)^* = Y(s)^*/U(s)^*$; e $F(s)$ é a função de transferência do FVE.

Da figura 4.5 fica evidente que a inclusão de $F(s)$ não altera a função de transferência estimada, como mostrado a seguir:

(4.16)

(4.17)

(4.18)

Uma alternativa para não se filtrar os sinais de controle e estes possuírem um atraso de tempo aproximado do atraso dos sinais de nível seria acrescentar um atraso de tempo diretamente aos sinais de controle. Mas, como o atraso de tempo gerado pelo filtro não é constante, o atraso de tempo que seria acrescentado diretamente aos sinais de controle poderia fazer com que houvesse um acúmulo de erro, e após longo período de funcionamento do processo os sinais de nível e os sinais de controle não estariam mais sincronizados. O algoritmo de estimação de parâmetros é alimentado com os sinais de controle filtrados, porém os sinais de controle que vão para os atuadores da planta são os sinais originais.

A figura 4.6 mostra, como exemplo, os sinais de controle original e filtrado da válvula FCV-01.

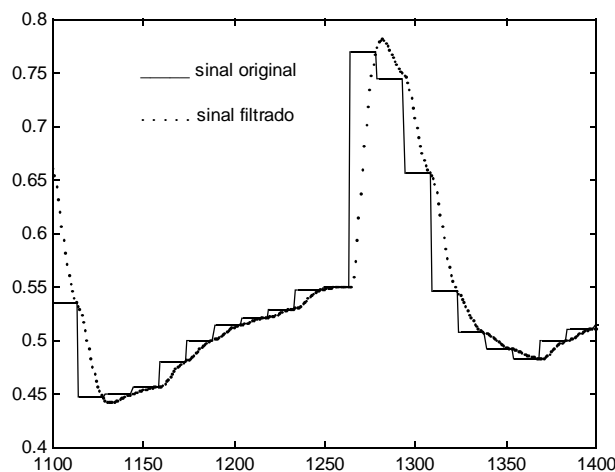


Figura-4.6 - Sinais de controle de FCV-01 original e filtrado.

A figura 4.7 mostra o sinal de nível do tanque TQ-03, obtido de simulação através do modelo matemático, sem a presença de ruído algum. Sua derivada, calculada pelo método de Euler (Johnson & Riess, 1982), é apresentada na figura 4.8. A figura 4.9 mostra o mesmo sinal de nível da figura 4.7 acrescido de um ruído branco⁴. A figura 4.10.a mostra a derivada do sinal da figura 4.9 calculada pelo método de Euler, enquanto que a figura 4.10.b mostra a derivada do mesmo sinal, porém calculada pelo FVE. Comparando-se as figuras 4.8 e 4.10.b pode-se notar que o FVE fornece uma derivada razoavelmente próxima à derivada do sinal sem ruído.

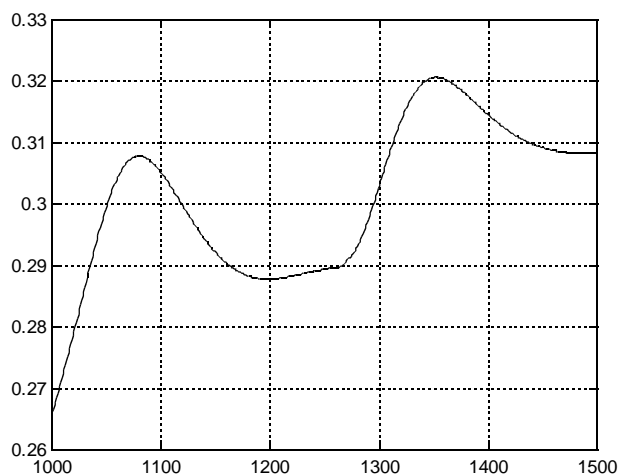


Figura-4.7 - Sinal de nível do tanque TQ-03 sem a presença de ruído.

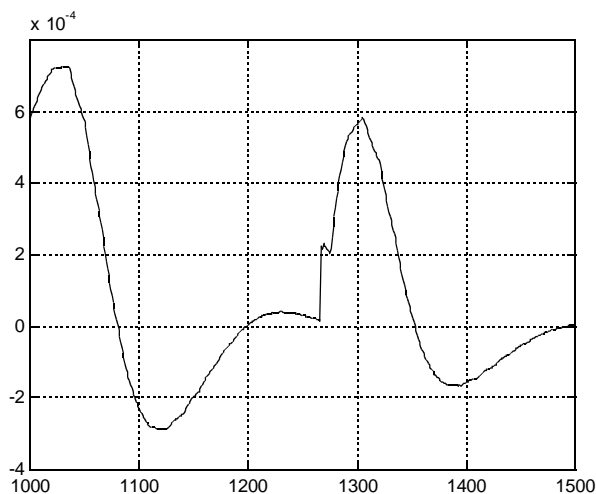


Figura-4.8 - Derivada do sinal de nível sem ruído calculada pelo método de Euler.

⁴As características deste ruído branco são discutidas no Capítulo 3, e fazem parte do modelo matemático que simula as condições reais de operação do STI.

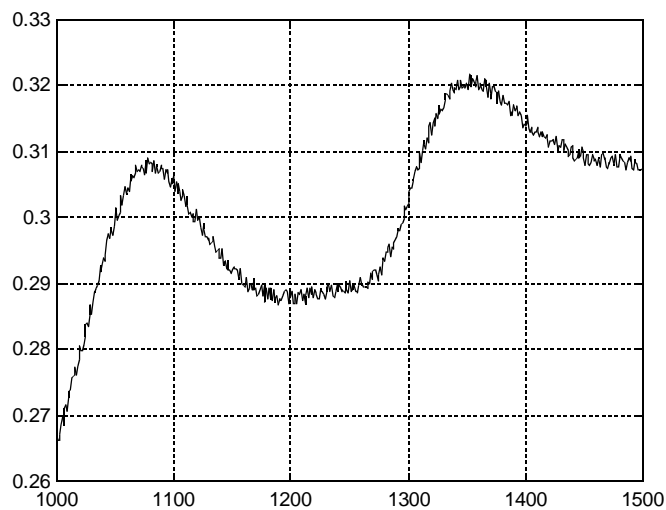


Figura-4.9 - Sinal de nível do tanque TQ-03 com a presença de ruído.

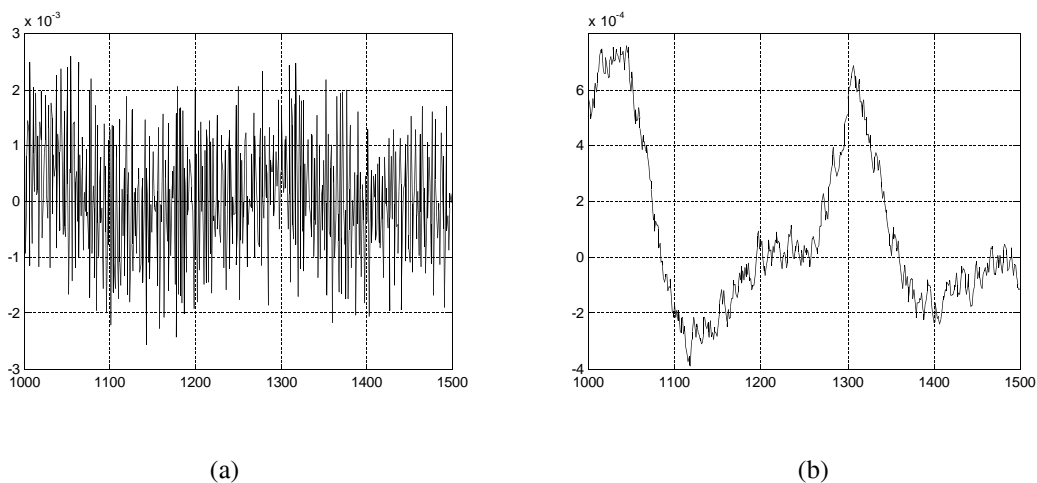


Figura-4.10 - a - Derivada do sinal de nível com ruído calculada pelo método de Euler.
- b- Derivada do sinal de nível com ruído calculada pelo FVE.

4.4.3 - Mínimos Quadrados Recursivo para o STI

Primeiramente é necessário definir quais parâmetros físicos deverão ser estimados no processo. Sabe-se do capítulo 3 que o modelo matemático do STI é o seguinte:

(4.19)

;

(4.20)

;

onde \dot{h}_2 e \dot{h}_3 são as derivadas primeiras em relação ao tempo dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03 respectivamente; $Q_{i_{max}}$ e $Q_{o_{max}}$ são as vazões máximas de entrada em TQ-02 e de saída em TQ-03 respectivamente; $q_{i_{pol}}(u_1)$ e $q_{o_{pol}}(u_2)$ são polinômios que ajustam a curva característica das válvulas FCV-01 e FCV-02, normalizados, respectivamente (ver Apêndice A); u_1 e u_2 são os sinais de controle que vão para as válvulas FCV-01 e FCV-02, respectivamente; Rh_2 e Rh_3 representam a resistência hidráulica entre os tanques TQ-02 e TQ-03 associada às equações (4.19) e (4.20), respectivamente; A_2 e A_3 são as áreas dos tanques TQ-02 e TQ-03, respectivamente.

Como este modelo matemático é composto de duas equações, é feita a estimação de parâmetros individualmente para as duas equações, ou seja, um algoritmo de mínimos quadrados recursivo é utilizado para estimar parâmetros de (4.19) e outro algoritmo do mesmo tipo é utilizado para estimar parâmetros de (4.20). Assim teremos:

(4.21)

;

(4.22)

,

onde ε_2 e ε_3 são os termos de erro que ocorrem por causa de ruídos nas medições, imprecisões no modelo matemático, e assim por diante (Phillips & Nagle, 1995). Os termos ε_2 e ε_3 são normalmente chamados de *resíduos*, mas neste trabalho serão referenciados por *erro*, para evitar confusão com o *resíduo* definido no capítulo 2.

Observando-se as equações (4.19) e (4.20), nota-se que os parâmetros Rh_2 e Rh_3 podem ser facilmente explicitados nos respectivos vetores de parâmetros. Estes parâmetros (Rh_2 e Rh_3) deverão possuir o mesmo valor, tanto em (4.19) quanto em (4.20), já que fazem referência à mesma variável (resistência hidráulica entre os tanques TQ-02 e TQ-03).

Para observar variações na vazão de entrada do tanque TQ-02, incluiu-se uma variável K_{qi} no primeiro termo do lado direito da equação (4.19). Qualquer variação da característica de funcionamento deste trecho da planta será refletida no parâmetro K_{qi} .

Em condições normais de funcionamento é de se esperar que o valor estimado desta constante seja igual a 1 (um). O mesmo raciocínio pode ser utilizado na equação (4.20). A inclusão de uma constante K_{qo} no segundo termo do lado direito da equação poderá ajudar a detectar variações na vazão de saída de TQ-03.

Rescrevendo as equações (4.19) e (4.20), tem-se:

$$(4.23)$$

;

$$(4.24)$$

Os vetores dos parâmetros a serem estimados θ_2 e θ_3 , referentes às equações (4.23) e (4.24) respectivamente, são:

$$(4.25)$$

;

$$(4.26)$$

Os vetores de regressores do processo são:

$$(4.27)$$

;

$$(4.28)$$

onde φ_2 e φ_3 são, respectivamente, os vetores de regressores referentes às equações (4.23) e (4.24).

Um problema detectado, quando se analisa as equações (4.23) e (4.24), é que torna-se necessário o conhecimento do valor do nível de TQ-02 para se fazer a estimação de parâmetros. No STI não havia medidor de nível no tanque TQ-02, e foi necessário a

instalação de um sensor (Camargo & Aguirre, 1997) para que se pudesse fazer a estimação dos parâmetros. Algum outro método, como por exemplo Observadores de Estado, poderia ser utilizado para suprir a falta deste medidor de nível (Pereira, 1996). A desvantagem deste procedimento é a acumulação dos erros devido à integração do processo (Aguirre et al., 1996). Optou-se então, pela instalação de um sensor de nível no tanque TQ-02. A disposição física do tanque TQ-02 permitiu a instalação deste novo sensor sem que houvesse qualquer alteração no restante do sistema.

4.4.4 - Inclusão de Termos de Erro

Um modelo matemático, por melhor que seja, nunca consegue explicar toda a dinâmica de um processo real. Isto faz com que apareça os *erros* (ver seção 4.4.3), que no caso do STI é a diferença entre a derivada real e a derivada estimada, ou seja:

(4.29)

;

(4.30)

A estrutura de um modelo matemático deveria ser capaz de absorver toda a informação útil fornecida pelos sinais de entrada e saída do processo. Por vários motivos, isto às vezes não acontece. No caso de estimação recursiva de parâmetros com modelo fixo, as diferenças entre o modelo matemático e o sistema real podem ser agravadas se as características dinâmicas do processo variam com o tempo. O ideal é que os erros sejam “brancos” (Norton, 1986). Uma maneira de se evitar a polarização dos parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados é a inclusão de termos referentes aos erros no vetor de regressores com seus respectivos coeficientes incluídos no vetor de parâmetros (Norton, 1986). Com isso, espera-se que parte daquilo que o modelo do STI não conseguir explicar seja absorvido pelos parâmetros associados aos termos de erro.

Optou-se pela inclusão, no vetor de regressores, de termos lineares de erro, por ser uma forma mais simples de implementação. Foram incluídos 35 termos de erro que se referem às últimas 35 interações no algoritmo de mínimos quadrados recursivo. Foram realizados testes *off-line*, porém utilizando estimação recursiva de parâmetros, com a mesma massa de dados para testar diferentes quantidades de termos de erro no modelo. Verificou-se através de testes de auto-correlação dos erros (Norton, 1986) que quanto maior o número de termos de erro no modelo menor é a polarização dos parâmetros, conforme esperado. Foram testadas quantidades que variaram entre 3 e 50 termos. O quantia de 35 termos foi escolhida devido a limitações de memória da biblioteca de

matrizes NEWMAT08 (Davies, 1995), utilizada para os cálculos do estimador de parâmetros.

Com isso os vetores de regressores, depois da inclusão dos termos de erro, passam a ser da seguinte forma:

$$(4.29)$$

;

$$(4.30)$$

,

onde \mathcal{E}_2 e \mathcal{E}_3 são os erros das equações (4.21) e (4.22), respectivamente; k representa a iteração atual do algoritmo de mínimos quadrados recursivo.

Os vetores de parâmetros tomam a seguinte forma:

$$(4.31)$$

;

$$(4.32)$$

,

onde ci_2 e ci_3 ($i=1,2,\dots,35$) são os parâmetros associados aos termos de erro dos vetores de regressores (4.29) e (4.30), respectivamente.

4.4.5 - Fixação dos Parâmetros Relacionados aos Termos de Erro

A inclusão dos termos de erro no algoritmo de estimação de parâmetros acarreta uma consequência grave, que tem que ser eliminada pelo menos em parte. Há uma melhora boa na estimação de parâmetros, uma vez que reduz a polarização dos erros, mas em consequência os parâmetros relacionados aos termos de erro tendem a absorver qualquer variação que ocorra no processo. É importante que as variações no processo (especialmente as falhas) se reflitam sobre os parâmetros observados do modelo matemático (K_{qi} , K_{qo} , Rh_2 e Rh_3) e não sobre os parâmetros referentes aos termos de erro. Isto faz com que, na ocorrência de uma falha no processo, os parâmetros observados se comportem como em situação normal, tornando mais difícil a tarefa de

detectar falhas. A monitoração dos parâmetros referentes aos termos de erro não resolve o problema, uma vez que estes parâmetros não variam suficientemente.

Uma alternativa encontrada foi a de se manter fixos os parâmetros referentes aos termos de erro juntamente com os próprios erros, durante um certo intervalo de tempo e permitir que eles se atualizem normalmente durante um outro intervalo de tempo. Isto faz com que o algoritmo de mínimos quadrados recursivo, ora estime somente com os termos do modelo original (equações 4.25-4.28), ora estime levando em consideração os termos de erro (equações 4.29-4.32). Com isto é possível se resolver, em parte, os problemas de polarização dos parâmetros e de insensibilidade a falhas. A figura 4.11 esquematiza o princípio de funcionamento deste procedimento.

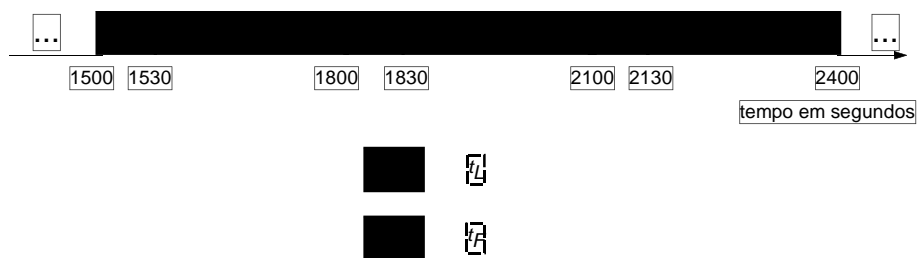


Figura-4.11 - Esquema de alternância entre parâmetros dos erros livres/fixos.

O tempo t_L em que o algoritmo de mínimos quadrados recursivo funciona com os parâmetros (referentes aos termos de erros) livres é de 30 segundos (30 interações) para um tempo t_F de 270 segundos (270 interações) em que estes parâmetros permanecem fixos. Estes intervalos de tempo foram estabelecidos de forma empírica. Um valor de t_L muito grande faz com que, caso ocorra uma falha neste período, todo o efeito da variação dos parâmetros originais não seja percebido. Se t_L for muito pequeno, o algoritmo de estimação de parâmetros passa, praticamente, a funcionar como se não existissem os termos referentes ao erro. Testes realizados mostraram que o valor de $t_L = 30$ segundos permite que na ocorrência de uma falha neste período, os parâmetros observados ainda possam variar após o término de t_L . Já o valor de t_F foi escolhido em função de t_L de forma a permitir que o algoritmo possa trabalhar com os parâmetros relativos aos termos de erros fixos por um tempo maior, para dar mais sensibilidade à variação dos parâmetros originais.

4.5 - Comentários Finais

Foram descritos neste capítulo vários procedimentos que visam a implementação do algoritmo de estimação recursiva de parâmetros. O Filtro de Variáveis de Estado apresentou-se como uma boa saída para o problema que envolve o uso de derivadas no algoritmo de estimação de parâmetros. O algoritmo de Mínimos Quadrados Recursivo contará com a presença de termos relacionados aos erros nas predições, para se diminuir a polarização dos parâmetros. Foi apresentado ainda um artifício para que se possa fazer a inclusão dos termos de erro sem que se prejudique demasiadamente a tarefa de detecção e isolamento de falhas. Resultados deste artifício são apresentados no capítulo 6. O capítulo seguinte traz os procedimentos adotados para a realização dos testes na planta com também os procedimentos adotados para a detecção e isolamento de falhas.

5 *Detecção e Isolação de Falhas no Sistema de Tanques Interativos*

5.1 - Introdução

Os métodos de Detecção e Isolação de Falhas (DIF) são geralmente específicos para um determinado sistema, entretanto ajustes nos métodos de DIF são normalmente necessários para otimizá-los. Estes ajustes visam uma maior rapidez e uma maior segurança na detecção e isolação de falhas. É preciso também que se tenha um bom conhecimento da planta e do processo que serão monitorados. É através deste conhecimento que as técnicas específicas de DIF serão implementadas.

O capítulo anterior apresentou o método de estimação recursiva de parâmetros que foi utilizado neste trabalho. De posse dos parâmetros estimados, é necessário agora definir o tratamento que será dado a estes parâmetros para que possam fornecer o máximo de informações úteis sobre as possíveis falhas que poderão estar ocorrendo no Sistema de Tanques Interativos (STI).

Este capítulo traz os procedimentos adotados neste trabalho para realizar a detecção e a isolação de falhas. São definidos os limites de tolerância para variação dos parâmetros

utilizando-se uma técnica de limites adaptativos, desenvolvida neste trabalho. Esta técnica permite que pequenas perturbações na estimativa dos parâmetros, que não sejam efetivamente falhas, possam passar despercebidas, evitando-se alarmes falsos. Outras técnicas de limites adaptativos podem ser encontradas na literatura (Emami-Naeini et al., 1988; Clark, 1989; DeLaat & Merrill, 1990; Zolghadri et al., 1993; Frank, 1994). Também é apresentado neste capítulo um procedimento para que os parâmetros converjam mais rapidamente após a ocorrência de uma falha.

5.2 - Procedimentos Adotados Para a Realização dos Testes

5.2.1 - Tempo de Duração dos Testes

O tempo de duração dos testes que foram executados no STI é de 50 minutos cada um. Este tempo é suficiente para que: os parâmetros converjam e tenham um certo período em regime permanente; uma falha seja implementada no processo e se verifique o comportamento pós-falha dos parâmetros; possam ser realizados vários testes em um dia.

5.2.2 - Definição dos *Set-Points* a Serem Utilizados nos Testes

Para a realização dos testes no STI, convencionou-se que os *set-points*, tanto de nível quanto de vazão, seriam da seguinte forma:

- *Amplitude*: com valores escolhidos aleatoriamente entre 40% e 60% de seus valores máximos;
- *Tempo de Duração*: com intervalos de tempo escolhidos aleatoriamente entre 200 e 300 segundos.

Os *set-points* de nível e de vazão não estão sincronizados, podendo ser alterados independentemente. Forma semelhante de implementação dos *set-points* foi utilizada anteriormente por Pereira (1996). Nota-se que esta forma de gerar *set-points* exige mais do algoritmo de DIF do que a maioria das condições normais de operação. Portanto este procedimento é mais exigente do que o necessário normalmente e constitui-se numa

forma de validar o procedimento adotado. A figura 5.1 mostra, como exemplo, a variação do *set-point* de nível num intervalo de tempo qualquer.

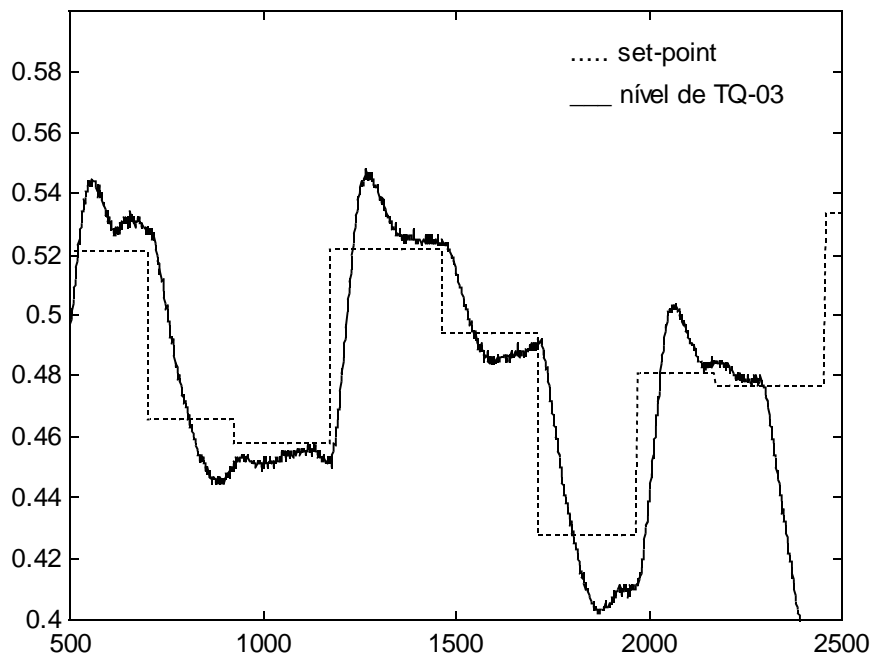


Figura-5.1 - Exemplo da variação aleatória do *set-point* de nível.

5.2.3 - Levantamento das Curvas Características das Válvulas Atuadoras

As curvas características das válvulas atuadoras se modificam de forma relativamente rápida, podendo assumir comportamentos bem diferentes em intervalos de até uma semana. Para uma maior exatidão no algoritmo de detecção e isolação de falhas fez-se o levantamento das curvas características das válvulas atuadoras (Pereira, 1996) todos os dias antes de se dar início à seção de testes na planta. Uma operação com curvas características desatualizadas faz com que os parâmetros estimados K_{qi} e K_{qo} possuam valores diferentes dos valores nominais iniciais.

5.2.4 - Calibração dos Sensores de Nível

Quando o processo não está em funcionamento, ou seja, não havendo vazão de entrada em TQ-02 e nem vazão de saída em TQ-03, e após atingir o regime permanente, os níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03 são iguais. Isto pode ser usado para assegurar que os medidores estejam coerentes.

Ao início dos testes, é feito um procedimento onde a leitura dos dois medidores de nível são igualadas para garantir que eles forneçam a mesma leitura para um mesmo valor de nível. Os medidores LE-01 e LE-02 já foram previamente calibrados, e este procedimento faz com que, ao se inicializar um teste, os medidores LE-01 e LE-02 forneçam a mesma leitura. Esta condição deve ser válida para qualquer valor de nível. Este procedimento dura 10 segundos e consiste em medir os níveis de TQ-02 e TQ-03 a cada segundo e obter a média das medições, \bar{h}_2 e \bar{h}_3 , dos níveis $h_2(t)$ e $h_3(t)$, respectivamente, com $(t = 1,2,3,\dots,10)$. É feita esta média para diminuir os efeitos de ruído aleatório nas medições. A diferença entre estas médias, $\Delta\bar{h}$ é somada à leitura de nível do tanque TQ-02 ao longo dos testes para garantir a coerência dos medidores de nível. Assim:

$$\Delta\bar{h} = \bar{h}_3 - \bar{h}_2. \quad (5.1)$$

Durante o funcionamento normal:

$$H_2 = h_2 + \Delta\bar{h}, \quad (5.2)$$

onde H_2 é o valor do nível do tanque TQ-02 utilizado para estimação dos parâmetros; e h_2 é o valor do nível do tanque TQ-02 medido na planta.

5.3 - Procedimentos Adotados Para Realizar a Detecção e Isolação de Falhas

5.3.1 - Valores Nominais dos Parâmetros

Os valores nominais dos parâmetros, antes do início da operação, que são utilizados para inicialização dos vetores θ_2 e θ_3 são¹:

- $K_{qi} = 1,0$;
- $K_{qo} = 1,0$;
- $Rh_2 = 270$;
- $Rh_3 = 270$.

¹O valor nominal de Rh foi levantado por Braga (1994).

5.3.2 - Inicialização do Vetor de Parâmetros

Os vetores de parâmetros θ_2 e θ_3 são inicializados com os valores nominais dos parâmetros K_{qi} e $1/Rh_2$, $1/Rh_3$ e K_{qo} , respectivamente (ver item 5.3.1). Isto faz com que o algoritmo de estimação de parâmetros saia de seu período transitório mais rapidamente do que se o vetor de parâmetros fosse inicializado com zeros.

5.3.3 - Inicialização das Matrizes de Covariância dos Parâmetros

As matrizes de covariância dos parâmetros P_2 e P_3 , referentes aos tanques TQ-02 e TQ-03 respectivamente, são ambas inicializadas do seguinte modo:

$$P_2 = P_3 = \begin{bmatrix} V & 0 & L & 0 \\ 0 & V & L & 0 \\ M & M & O & M \\ 0 & 0 & L & V \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

onde $V = 10.000$. Vários testes foram realizados e observou-se que quanto maior o valor de V , mais rápido os parâmetros convergiam. A escolha do valor $V=10.000$ é devida a uma saturação que ocorre em torno deste valor, ou seja, a velocidade de convergência dos parâmetros não aumenta de forma significativa para valores superiores a este.

5.3.4 - Fixação dos Elementos das Matrizes de Covariância dos Parâmetros

A estimação de parâmetros por mínimos quadrados recursivo pode ter uma boa resposta para a variação dos parâmetros se eles variarem pouco (Korbicz et al., 1993). Na ocorrência de uma falha, a variação dos parâmetros do processo pode se realizar de forma abrupta, e para o propósito de detecção e isolação de falhas é bom que os parâmetros estimados também variem rapidamente. Neste caso, a estimação de parâmetros torna-se deficiente porque os elementos da matriz de covariância dos parâmetros decrescem monotonicamente com o passar das iterações e com isso, a estimação dos parâmetros não é boa para variações rápidas no tempo (Korbicz et al., 1993). A matriz de covariância P está diretamente relacionada com a atualização dos parâmetros no vetor θ (como pode ser observado na equação 4.3) e representa uma matriz de pesos para a correção dos parâmetros (Norton, 1986). Se os elementos da matriz P forem muito pequenos, quando houver uma variação nos parâmetros do processo o vetor θ será corrigido lentamente.

A maneira utilizada neste trabalho para se prevenir a degradação do algoritmo de mínimos quadrados recursivo é a fixação dos elementos das matrizes de covariância dos parâmetros P_2 e P_3 . Como não se pode prever o instante em que ocorrerá uma falha, é necessário a definição do momento em que os elementos das matrizes de covariância serão mantidos fixos. Este procedimento é aplicado no STI após decorridos 1.500 segundos de funcionamento do algoritmo de estimação de parâmetros, e os elementos das matrizes de covariância ficam fixos com os valores que possuíam neste momento. Para a escolha deste tempo, vários testes foram realizados observando-se tanto os parâmetros estimados quanto os elementos das matrizes de covariância. Observou-se que quanto mais cedo fossem fixados os elementos das matrizes de covariância, mais os parâmetros estimados iriam oscilar em torno do valor de regime permanente, podendo com isso, aumentar a taxa de alarmes falsos. A espera de tempo de 1.500 segundos mostrou ser satisfatória, pois mantém uma boa relação entre o tempo de detecção de falhas e o número de alarmes falsos.

Outros métodos para se evitar o problema da degradação de algoritmos de estimação de parâmetros recursivo são propostos em (Sriyananda, 1972; Yoshimura et al., 1979; Korbicz, 1993).

5.3.5 - Reset da Matriz de Covariância dos Parâmetros

No momento em que é detectada uma falha, as matrizes de covariância P_2 e P_3 são inicializadas novamente da mesma forma que ocorre no início da estimação de parâmetros e com os mesmos valores (ver item 5.3.3). Isto se faz para que, após a detecção de uma falha, os parâmetros estimados convirjam mais rapidamente para os valores pós-falha, permitindo assim uma isolação de falhas mais rápida.

5.3.6 - Utilização de Recursos Extras para a Detecção e Isolação de Falhas

Toda informação extra, além dos parâmetros estimados, que puder ser usada para a detecção e isolação de falhas é bem vinda. Com base neste pensamento, pode-se definir dois parâmetros extras que serão muito úteis para a detecção e isolação de falhas.

As vazões de entrada de TQ-02 e de saída de TQ-03 podem ser calculadas através dos polinômios que relacionam os sinais de controle (u_1 e u_2) com as respectivas leituras de vazões (ver Apêndice A). Estas vazões calculadas ($q_{i_{pol}}(u_1)$ e $q_{o_{pol}}(u_2)$) são comparadas com as vazões medidas (q_i e q_o). As diferenças entre a leitura da vazão fornecida pelo medidor e a vazão calculada através dos polinômios serão os parâmetros auxiliares,

definidos como dq_i e dq_o , referentes às vazões de entrada de TQ-02 e de saída de TQ-03, respectivamente:

$$dq_i = q_i - qi_{pol}(u_1) ; \quad (5.4)$$

$$dq_o = q_o - qo_{pol}(u_2) . \quad (5.5)$$

Estes parâmetros auxiliares serão monitorados da mesma forma que os parâmetros estimados. Detalhes sobre o comportamento destes parâmetros podem ser obtidos no Capítulo 6.

5.3.7 - Tempo de Espera para o Algoritmo de DIF começar a atuar

Após serem inicializados os testes, são esperados 1.000 segundos (1.000 interações) para que o algoritmo de DIF possa começar a atuar. Antes disto, somente o algoritmo de estimação de parâmetros estará funcionando. Isto é necessário para se evitar alarmes falsos durante a inicialização dos testes, uma vez que o algoritmo de estimação de parâmetros passa por um período transitório, em que os parâmetros estimados ainda estão variando bastante. O valor de 1.000 segundos foi estabelecido de forma empírica após a realização de vários testes na planta. A liberação do algoritmo de DIF para atuar antes de 1.000 segundos poderá acarretar alarmes falsos, uma vez que os parâmetros no início da estimação estão se comportando de forma um pouco instável, podendo oscilar fora dos limites de tolerância.

5.4. - Definição dos Limites de Tolerância para Variação dos Parâmetros

5.4.1 - Introdução

O acompanhamento dos parâmetros estimados exige que se definam limites, dentro dos quais, os parâmetros possam variar sem que, necessariamente, esta variação seja considerada uma falha. Os limites de tolerância devem ser bem ajustados para permitir que o procedimento de DIF acuse uma falha, quando houver, num tempo suficientemente rápido para que sejam tomadas as providências cabíveis antes que possa ocorrer um dano maior ao sistema. Limites de tolerância fixos durante toda uma operação fazem com que, no caso de mudanças normais no processo, os parâmetros

estimados possam variar o suficiente para ultrapassar estes limites e acusarem a presença de falha, sem que efetivamente uma falha estivesse ocorrendo. Estas mudanças normais no processo podem ser interpretadas como não-linearidades e não-estacionariedades que não foram totalmente modeladas e que, quando há mudanças de *set-point*, por exemplo, novas regiões de trabalho são atingidas e conseqüentemente seus efeitos são refletidos nos parâmetros estimados.

Uma maneira de se tentar contornar esta situação é tornar os limites de tolerância adaptativos, fazendo com que estes fiquem robustos às variações normais nos parâmetros. Serão estabelecidos limites de tolerância superiores e inferiores, variáveis, em torno do valor estimado dos parâmetros. A largura da faixa de tolerância, ou seja, a diferença entre o limite superior e o limite inferior, também será variável. Os critérios utilizados para a definição dos limites de tolerância, bem como para a definição da largura da faixa de tolerância são apresentados nas seções seguintes.

5.4.2 - Ponto de Referência

Chama-se *ponto de referência* o valor em torno do qual são estabelecidos os limites de tolerância para variação dos parâmetros (ver figura 5.2). Este ponto de referência poderia ser o próprio valor nominal dos parâmetros (ver seção 5.3.1), caso o processo não apresentasse variações nas suas condições nominais durante a operação. Estas alterações, embora pequenas e aceitáveis para o bom funcionamento do sistema, podem fazer com que ocorram alarmes falsos se o ponto de referência não for reajustado, pois o ponto de referência acompanha o comportamento dos parâmetros estimados.

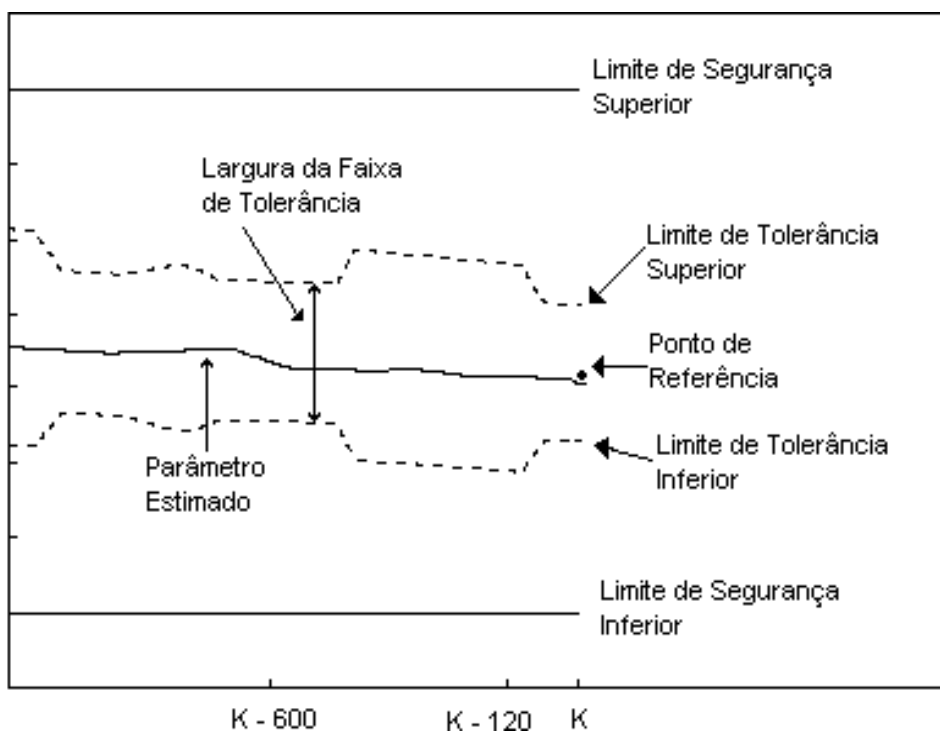


Figura-5.2 - Exemplo dos procedimentos definidos no item 5.4

O ponto de referência é calculado como descrito abaixo.

Seja p_n ($n = 0,1,2,\dots,k$) um parâmetro qualquer estimado nos instantes n , e k o instante atual da estimação do parâmetro. O *ponto de referência* (PR) no instante k é:

$$PR_k = \frac{\sum_{j=k-600}^{k-120} (p_j)}{480} ; \tag{5.6}$$

ou seja, a média da janela do sinal do parâmetro estimado compreendida entre os últimos 600 e 120 segundos (ver figura 5.3).

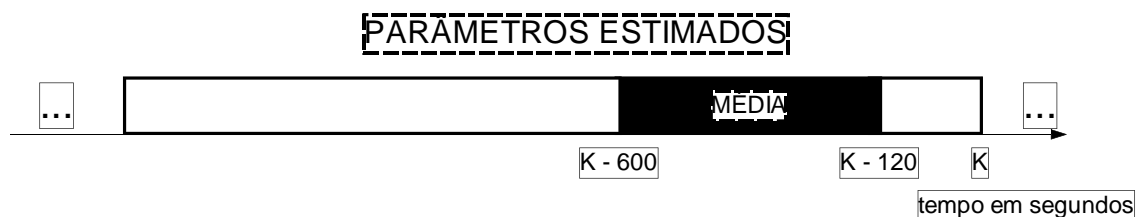


Figura-5.3 - Esquema da média da janela de pontos.

O ponto de referência é calculado a cada iteração. O tamanho da janela (480 segundos) bem como o atraso de tempo da janela em relação ao instante atual (120 segundos) foram determinados empiricamente. Este atraso de tempo é necessário para que os últimos valores estimados do parâmetro não interfiram na definição da sua respectiva faixa de tolerância. Havendo uma alteração no parâmetro estimado, os limites de tolerância irão começar a se adaptar a esta variação somente 120 segundos depois. Enquanto toda a variação do parâmetro não estiver dentro da janela considerada para a obtenção da média, as faixas de tolerância ainda não terão se adaptado totalmente a esta variação no parâmetro. Isto permite que, com uma variação nos parâmetros um pouco mais intensa provocada por uma falha, os valores estimados do parâmetro ultrapassem a faixa de tolerância indicando a ocorrência de uma falha no processo. Já o tamanho da janela relaciona o quanto de importância é dada à história passada do parâmetro. Uma janela muito grande pode fazer com que informações muito anteriores às atuais sejam levadas em consideração e também pode fazer com que informações mais recentes sobre as variações na estimativa dos parâmetros recebam pouca importância, uma vez que se estaria trabalhando com a média de um conjunto de dados muito grande, tornando estas informações mais recentes pouco significativas. Uma janela de dados muito pequena pode fazer com que a faixa de tolerância se adapte muito rapidamente às novas condições de operação, permitindo que variações nos parâmetros que sejam efetivamente falhas passem despercebidas.

5.4.3 - Largura da Faixa de Tolerância

Largura da faixa de tolerância é a distância entre os limites superior e inferior, entre os quais um determinado parâmetro pode variar sem que seja considerada a presença de falha no processo (ver figura 5.2). A largura da faixa de tolerância é variável ao longo da operação e vai depender do comportamento do respectivo parâmetro estimado. Quanto maior a variância do parâmetro estimado dentro de um determinado intervalo de tempo, maior será a largura da faixa de tolerância e vice versa. Este procedimento faz com que um parâmetro que apresente um comportamento não muito constante, mas aceito como normal, tenha a largura da faixa de tolerância maior para evitar alarmes falsos. Por outro lado, o parâmetro que tem um comportamento constante pode ter uma faixa de tolerância mais estreita, permitindo a detecção de falhas de forma mais rápida.

A largura da faixa de tolerância é variável entre um valor de largura máxima e um valor de largura mínima. Estes valores máximo e mínimo são definidos para que a faixa de tolerância não se alargue e nem se estreite muito. Uma faixa de tolerância muito larga pode fazer com que variações no parâmetro estimado relativas à falha no processo não sejam detectadas como falha. Já a faixa de tolerância muito estreita faz com que ocorram alarmes falsos para pequenas variações nos parâmetros, variações estas não originadas de falhas no processo.

A largura da faixa de tolerância é calculada do seguinte modo:

Seja p_n ($n = 0,1,2,\dots,k$) um parâmetro qualquer estimado nos instantes n , e k o instante atual da estimação do parâmetro. A largura da faixa de tolerância (LF) no instante k é:

$$LF_k = LS_k - LI_k, \quad (5.7)$$

onde LS_k é o limite superior para variação do parâmetro no instante k e LI_k é o limite inferior para variação do parâmetro no instante k .

Os limites superior e inferior da faixa de tolerância são calculados assim:

$$LS_k = PR_k + 20 DP_{k-600}^{k-120}; \quad (5.8)$$

$$LI_k = PR_k - 20 DP_{k-600}^{k-120}, \quad (5.9)$$

onde DP_{k-600}^{k-120} é o desvio padrão do parâmetro estimado no intervalo de tempo entre os últimos 600 e 120 segundos (ver figura 5.4).

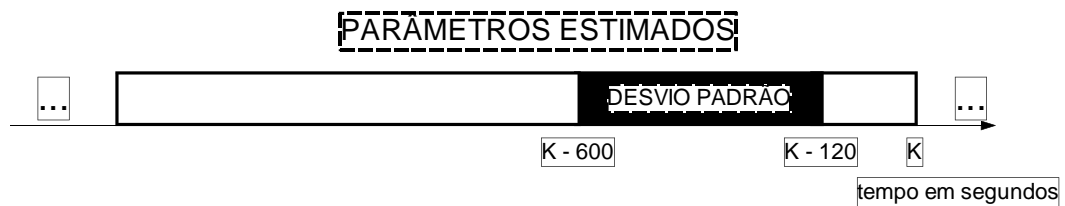


Figura-5.4 - Esquema do desvio padrão da janela de pontos.

O cálculo do desvio padrão (Papoulis, 1984) utiliza a seguinte equação:

$$DP_{k-600}^{k-120} = \sqrt{\frac{\sum_{j=k-600}^{k-120} (p_j - \bar{p})^2}{479}}, \quad (5.10)$$

onde \bar{P} é o valor médio do parâmetro estimado para a respectiva janela de pontos.

Os valores de largura máxima e largura mínima entre os quais a largura da faixa de tolerância poderá variar são definidos a seguir:

$$\text{Limite superior máximo} \Rightarrow LS_{max_k} = 1,15 PR_k ;$$

$$\text{Limite superior mínimo} \Rightarrow LS_{min_k} = 1,10 PR_k ;$$

$$\text{Limite inferior máximo} \Rightarrow LI_{max_k} = 0,85 PR_k ;$$

$$\text{Limite inferior mínimo} \Rightarrow LI_{min_k} = 0,90 PR_k .$$

Com isto, pode-se observar que a largura da faixa de tolerância irá variar entre 20% e 30% em relação ao ponto de referência PR_k . (ver figura 5.5). Estes valores foram determinados após a realização de vários testes e mostraram-se satisfatórios.

As considerações relativas ao tamanho da janela e ao atraso da janela em relação ao instante atual são as mesmas da seção 5.4.2.

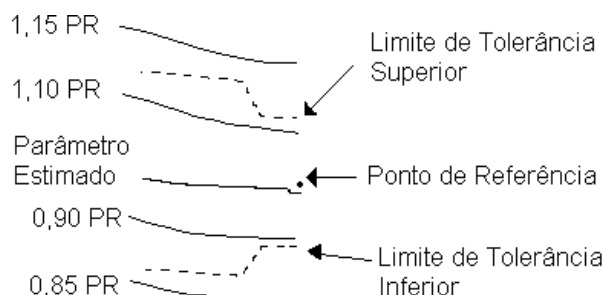


Figura-5.5 - Esquema da definição das larguras máxima e mínima da faixa de tolerância.

5.4.4 - Limites de Segurança

Os limites de segurança são valores fixos durante toda a operação, os quais não poderão ser ultrapassados, em hipótese alguma, pelo parâmetro estimado (ver figura 5.2). Estes limites de segurança servem para que o valor estimado do parâmetro não ultrapasse determinados valores sem que antes tenha sido detectada a ocorrência de falha no processo. Para variações muito lentas no parâmetro estimado, os limites de tolerância irão acompanhar estas variações e não haverá detecção de falhas. Os limites de segurança impedem que o valor estimado do parâmetro tenha um valor muito grande ou muito pequeno em relação aos valores nominais da seção 5.3.1.

O valor dos limites de segurança superiores (LSS) e inferiores (LSI) adotados são:

$$\text{Parâmetro } K_{qi} \Rightarrow LSS_{kqi} = 1,5 \text{ e } LSI_{kqi} = 0,5 ;$$

Parâmetro $K_{q_0} \Rightarrow LSSkq_0 = 1,5$ e $LSIkq_0 = 0,5$;

Parâmetro $Rh_2 \Rightarrow LSSrh_2 = 400$ e $LSIrh_2 = 100$;

Parâmetro $Rh_3 \Rightarrow LSSrh_3 = 400$ e $LSIrh_3 = 100$;

É importante salientar que estes *limites de segurança* ainda não garantem total segurança do processo. Dependendo do tempo de operação do sistema numa determinada condição anormal, poderá haver danos ao processo mesmo estando os parâmetros estimados dentro destes limites de segurança. Com estes limites de segurança pretende-se apenas que não aconteçam danos maiores ao processo, danos estes que poderiam ser evitados observando-se a divergência dos parâmetros estimados. Outras medidas de segurança, como por exemplo bóias para se evitar o transbordamento dos tanques, devem ser utilizadas. O algoritmo de DIF implementado neste trabalho pretende apenas detectar falhas que se manifestem de forma repentina. Este algoritmo de DIF não está apto a detectar falhas que se manifestem de forma lenta.

5.4.5 - Limites de Tolerância para os Parâmetros Auxiliares dq_i e dq_o

A exemplo dos parâmetros estimados (K_{q_i} , Rh_2 , K_{q_0} e Rh_3) os parâmetros auxiliares dq_i e dq_o também possuem limites de tolerância, dentro dos quais podem variar. Durante as aberturas e fechamentos das válvulas atuadoras (FCV-01 e FCV-02), estes parâmetros auxiliares possuem valores relativamente maiores que os valores quando as válvulas estão em repouso. Estreitar as faixas de tolerância em torno destes parâmetros pode ser perigoso, pois repentinamente eles podem aumentar seus valores, acarretando alarmes falsos. Deve-se trabalhar com a largura da faixa de tolerância suficiente para que as variações destes parâmetros nas ocasiões de abertura e fechamento das válvulas atuadoras não ultrapassem os limites de tolerância. Observou-se nos testes realizados que os valores destes parâmetros oscilam sempre em torno de um mesmo valor médio ao longo de toda a operação. Com isto, optou-se por fazer com que os limites de tolerância destes parâmetros fossem fixos durante a operação, não precisando ser adaptativos como no caso dos parâmetros estimados.

Os limites de tolerância para estes parâmetros auxiliares são estabelecidos do seguinte modo:

Parâmetro dq_i :

$$LS = MD + 15 DP|_0^{1000} ; \quad (5.11)$$

$$LI = MD - 15 DP|_0^{1000} ; \tag{5.12}$$

Parâmetro dq_o :

$$LS = MD + 10 DP|_0^{1000} ; \tag{5.13}$$

$$LI = MD - 10 DP|_0^{1000} , \tag{5.14}$$

onde MD e $DP|_0^{1000}$ são, respectivamente, a média e o desvio padrão dos primeiros 1.000 valores de cada parâmetro (ver figuras 5.6 e 5.7). Estes limites de tolerância estabelecidos no instante 1.000 segundos serão utilizados durante toda a operação.

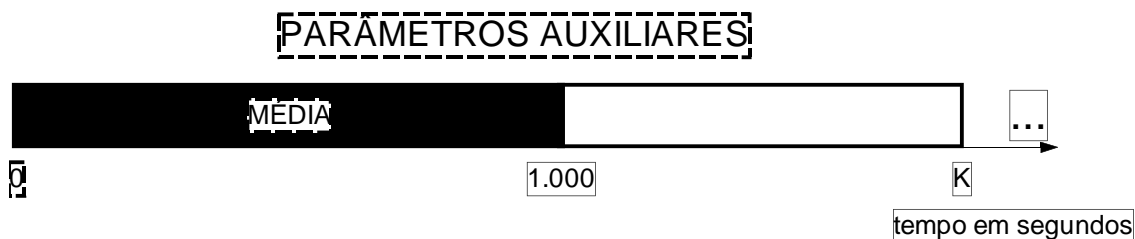


Figura-5.6 - Esquema da média dos primeiros 1.000 pontos.

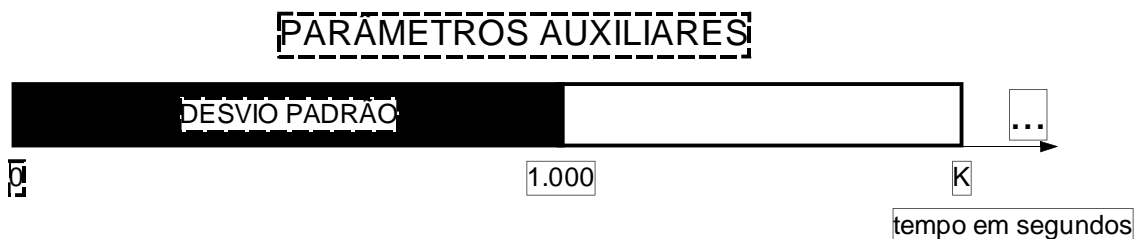


Figura-5.7 - Esquema do desvio padrão dos primeiros 1.000 pontos.

5.4.6 - Tempo de Espera para a Detecção da Falha

O tempo de espera para a detecção da falha é o intervalo de tempo, a partir do momento em que um parâmetro ultrapassa um dos limites de tolerância até o algoritmo de DIF informar que está havendo falha no sistema. Este intervalo de tempo serve para que se tenha uma informação mais concreta a respeito da ocorrência de uma falha. Mudanças de *set-point*, por exemplo, podem fazer com que um parâmetro saia da faixa de tolerância e retorne imediatamente. Este tempo de espera tem como objetivo reduzir a taxa de alarmes falsos e ao mesmo tempo poder trabalhar com uma faixa de tolerância mais estreita. O tempo de espera para a detecção de uma falha utilizado neste trabalho é

de 5 segundos, ou seja, 5 iterações. Portanto, para o algoritmo de DIF acusar uma falha será necessário que um dos parâmetros, estimados ou auxiliares, fique pelo menos 5 iterações fora da faixa de tolerância. O tempo que se perde para se ter o conhecimento de uma falha no processo devido a este procedimento é compensado pelo tempo que se ganha em se poder trabalhar com faixas de tolerância mais estreitas. Por outro lado, também se ganha com a redução da taxa de alarmes falsos.

5.5 - Comentários Finais

Métodos de DIF requerem cuidados especiais para cada aplicação. Para o STI foram necessários procedimentos específicos na planta para a realização dos testes. Há a necessidade que se tenha uma boa instrumentação no processo e por isso dois procedimentos tiveram que ser adotados para lidar com certas características da instrumentação encontradas na planta. Os procedimentos são o levantamento da curva característica das válvulas atuadoras e a calibração dos sensores de nível. O método matemático em si também precisou de alguns ajustes especiais. Este capítulo apresentou também uma técnica de limites de tolerância adaptativos para a variação dos parâmetros. Resultados dos procedimentos descritos neste capítulo são apresentados no capítulo seguinte, que traz ainda os comentários sobre os testes realizados na planta e a metodologia adotada para se efetuar a isolação das falhas.

6 *Resultados Práticos: Comentários e a Técnica de Isolação de Falhas*

6.1 - Introdução

Neste capítulo 6 são apresentados os resultados práticos obtidos durante os testes realizados na planta. Foram implementadas todas as falhas descritas no capítulo 3, e para cada tipo de falha é feito um comentário individual. Vários testes foram realizados para um mesmo tipo de falha, e alguns testes também foram realizados sem a implementação de falha alguma, para a verificação de alarmes falsos. Ao todo foram realizados 41 testes. Os resultados gráficos mais característicos são mostrados neste capítulo.

Durante a apresentação dos resultados de cada falha serão descritas as características necessárias para que estas falhas sejam isoladas adequadamente. Um método lógico para a isolação de falhas é apresentado neste capítulo. Este método é capaz de isolar a falha e também de quantificá-la como SUAVE, MÉDIA ou GRAVE.

6.2 - Resultados dos Testes Realizados no STI

6.2.1 - Vazamento no Duto Entre TQ-02 e TQ-03

Este tipo de vazamento é realizado através da válvula FV-05. Em condições normais de funcionamento do processo, a válvula FV-05 permanece fechada. Para a realização desta falha, a válvula FV-05 é aberta até produzir o vazamento desejado. A relação entre o número de voltas da válvula FV-05 e a constante de vazamento k_{v23} do modelo matemático de falhas é mostrada na tabela 6.1, e foi determinada em (Pereira, 1996). É importante salientar, que mesmo com a intenção de se realizar uma falha brusca, na prática esta falha leva alguns segundos entre o instante em que se inicia até o momento em que se obtém a intensidade desejada da falha, devido ao tempo de abertura da válvula. Como este tempo é pequeno, cerca de 2 a 3 segundos, será considerado como se esta falha ocorresse de forma brusca.

Tabela-6.1 - Relação entre o número de voltas em FV-05 e k_{v23} (Pereira, 1996).

<i>Voltas em FV-05</i>	k_{v23}
1,0	0,01
1,5	0,06
2,0	0,10
2,5	0,16
3,0	0,23
10,0	1,0

Esta falha faz com que a malha de nível seja afetada. Enquanto a vazão máxima de entrada em TQ-02 puder ser maior que a vazão de saída em TQ-03 somada à vazão por FV-05, a malha de nível será controlada. Para um vazamento muito intenso, em que a condição anterior não é satisfeita, a malha de nível deixa de ser controlável. A malha de vazão não é afetada desde que o nível do tanque TQ-03 permaneça acima do mínimo para que o intertravamento do CLP não desligue a bomba BA-02.

Foram implementados vazamentos no processo com diferentes intensidades. Observou-se que quanto maior a intensidade do vazamento, menor é o tempo de detecção da falha. Os parâmetros estimados (K_{qi} , Rh_2 , K_{qo} e Rh_3) para um teste típico realizado na planta, com constante de vazamento $k_{v23} = 0,23$, são mostrados na figura 6.1. Esta falha foi implementada no instante 2.240 segundos e sua detecção ocorreu 34 segundos após, através do parâmetro Rh_3 .

(a)

(b)

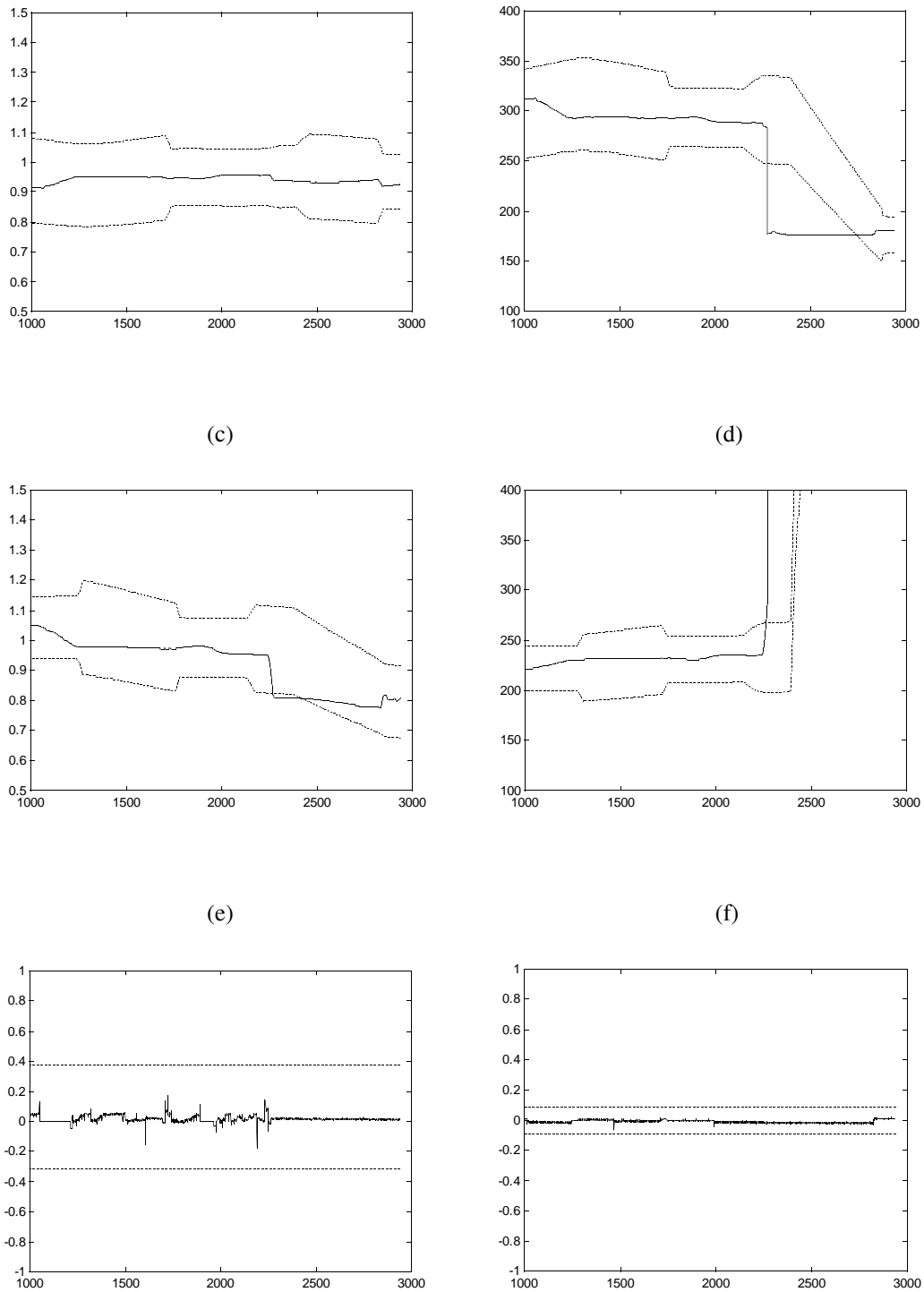


Figura-6.1 - Parâmetros estimados e auxiliares para um vazamento entre TQ-02 e TQ-03.

a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

Era de se esperar que os parâmetros K_{qi} e K_{qo} não se alterassem porque não houve falha nos dutos entre TQ-01 e TQ-02 e nem entre TQ-03 e TQ-01. Como pode ser observado na figura 6.1.c, o parâmetro K_{qo} se alterou um pouco. Os parâmetros Rh_2 e Rh_3 deveriam possuir o mesmo comportamento para a situação seguinte à falha, já que se referem à

mesma variável (resistência hidráulica entre TQ-02 e TQ-03). Embora apresentem um comportamento oposto, estes parâmetros sempre se comportaram desta forma nos vários testes realizados.

6.2.2 - Entupimento no Duto Entre TQ-02 e TQ-03

Este entupimento pode ser realizado na prática através das válvulas manuais FV-03 e FV-04. Em funcionamento normal, estas duas válvulas permanecem totalmente abertas. Para a implementação deste entupimento no processo, utilizou-se a válvula FV-04 por ser mais fácil acessá-la, devido à sua localização na planta de tanques interativos. Com o fechamento da válvula FV-04, simula-se o entupimento entre os tanques TQ-02 e TQ-03. A relação entre o número de voltas da válvula FV-04 e a constante de entupimento entre os tanques TQ-02 e TQ-03 k_{e23} do modelo matemático de falhas é apresentada na tabela 6.2 e foi determinada em (Pereira, 1996). A implementação desta falha é também considerada de forma brusca. Os comentários no item 6.2.1 sobre a abertura brusca da válvula FV-05 são válidos também para o fechamento da válvula FV-04.

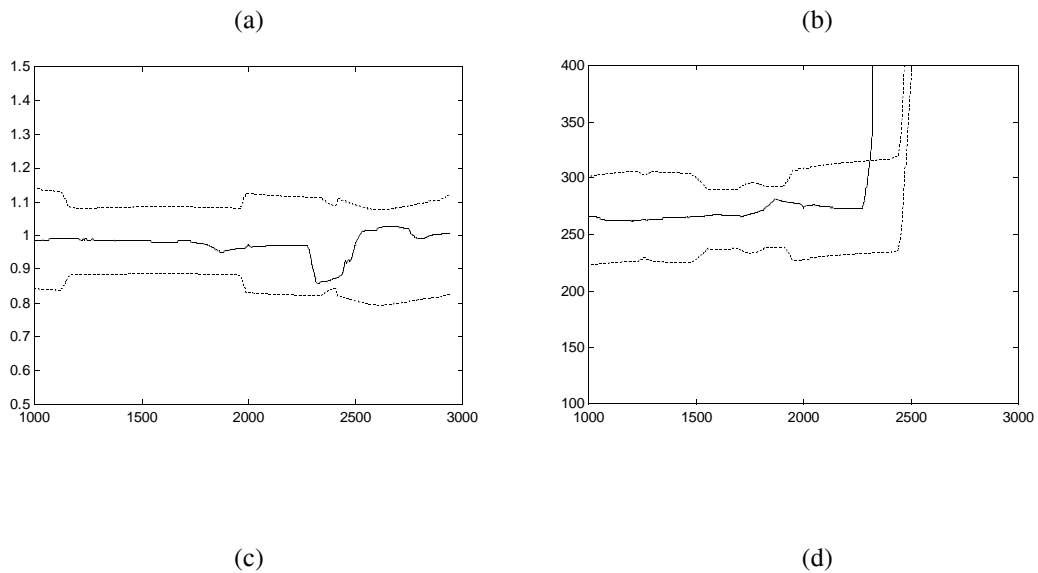
Tabela-6.2 - Relação entre o número de voltas em FV-04 e k_{e23} (Pereira, 1996).

<i>Voltas em FV-04</i>	k_{e23}
6,0	0,25
7,0	0,41
8,0	0,61
8,5	0,73
9,5	0,98
10,0	1,0

O fechamento da válvula FV-04 aumenta o tempo morto na malha de nível, alterando consideravelmente toda a dinâmica da planta (Braga, 1994). Dependendo do grau de entupimento, o controle de nível não será mais possível com os atuais ajustes do controlador, fazendo com que a malha de nível se torne instável. Para valores muito pequenos de entupimento, a malha de nível nem percebe que está ocorrendo alguma falha no processo. O entupimento entre os tanques TQ-02 e TQ-03 não altera a malha de vazão desde que o nível de TQ-03 fique sempre acima do mínimo para que o intertravamento do CLP não desligue a bomba BA-02.

Entupimentos entre os tanques TQ-02 e TQ-03 de diferentes intensidades foram implementados no processo. Observou-se que, não necessariamente, um entupimento de grau maior terá tempo de detecção de falha mais rápido que um entupimento de grau menor. Isto pode ser explicado pelo fato de que, numa tubulação qualquer, o fechamento parcial de uma válvula não quer dizer, necessariamente, que haverá uma redução de vazão. Tudo vai depender do valor da vazão existente no momento. Para pequenas vazões, o estrangulamento de uma válvula pode não alterar nada, no que diz respeito ao valor de vazão. As conseqüências de um entupimento de pequena intensidade podem ser sentidas algum tempo depois, como por exemplo numa mudança de *set-point* de nível que fizesse com que aumentasse a vazão entre os tanques TQ-02 e TQ-03.

Os parâmetros estimados (K_{qi} , Rh_2 , K_{qo} e Rh_3) comportaram-se nos diversos testes como era de se esperar: os parâmetros Rh_2 e Rh_3 aumentaram sempre na mesma proporção indicando o aumento da resistência hidráulica entre os tanques TQ-02 e TQ-03, o que significa um possível entupimento; os parâmetros K_{qi} e K_{qo} não se modificaram, a não ser no momento em que houve o *reset* das matrizes de covariância P_2 e P_3 (ver seção 5.3.5), o que é normal de acontecer. Os parâmetros estimados para um caso típico, com constante de entupimento $k_{e23} = 0,73$, tempo de implementação da falha igual a 2.260 segundos e tempo de detecção da falha de 79 segundos, são mostrados na figura 6.2.



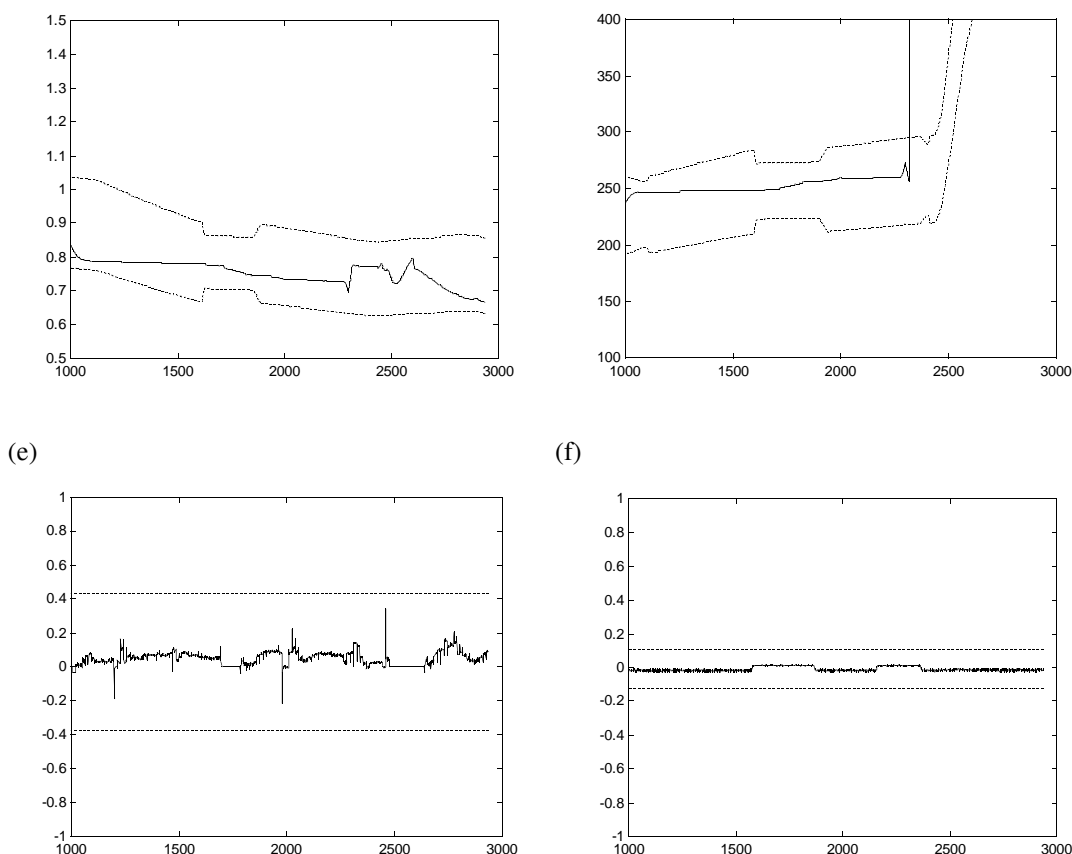


Figura-6.2 - Parâmetros estimados e auxiliares para um entupimento entre TQ-02 e TQ-03.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.3 - Entupimento no Duto Entre TQ-01 e TQ-02

Esta falha foi implementada no processo através da válvula FV-AQ¹. Em funcionamento normal, esta válvula permanece aberta. Para realizar o entupimento no duto de entrada de TQ-02 é necessário que se feche a válvula FV-AQ. A relação entre o número de voltas da válvula FV-AQ e a constante de entupimento entre os tanques TQ-01 e TQ-02 k_{e12} do modelo matemático de falhas é mostrada na tabela 6.3, e foi determinada em (Pereira, 1996). A implementação desta falha é também considerada de forma brusca. Os comentários no item 6.2.1 sobre a abertura brusca da válvula FV-05 são válidos também para o fechamento da válvula FV-AQ.

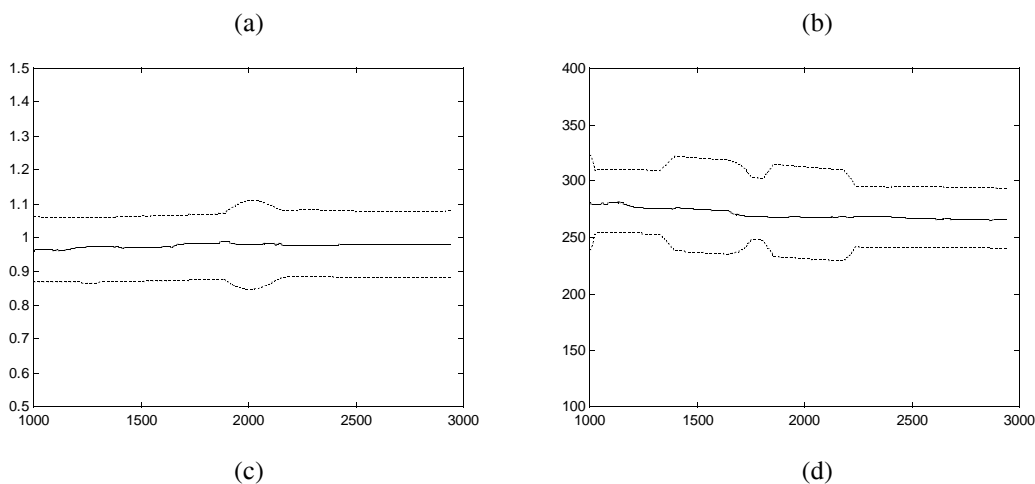
Tabela-6.3 - Relação entre o número de voltas em FV-AQ e k_{e12} (Pereira, 1996).

¹Esta válvula não está relacionada no fluxograma de engenharia da figura 3.2. Ela está localizada na entrada do aquecedor AQ-01, instalada na própria tubulação entre TQ-01 e TQ-02.

Voltas em FV-AQ	k_{e12}
4,0	0,10
6,0	0,45
6,25	0,75
6,5	0,87

Esta falha faz com que a vazão máxima de entrada de TQ-02 seja reduzida e, conseqüentemente, o controle da malha de nível faz com que a atuação da válvula FCV-01 seja maior para compensar o efeito do entupimento. A malha de nível fica comprometida quando a vazão máxima de entrada de TQ-02 não consegue ser superior à vazão de saída de TQ-03. A malha de vazão só é alterada quando o nível de TQ-03 atinge o valor mínimo capaz de fazer com que o intertravamento do CLP desligue a bomba BA-02.

Vários testes foram realizados na planta simulando-se entupimentos no duto de entrada de TQ-02. Diferentes graus de entupimento foram testados. Observou-se que para entupimentos de pequena intensidade, a vazão entre TQ-01 e TQ-02 só era alterada quando o controlador de nível exigia altas vazões de entrada em TQ-02, ou seja, abertura total, ou quase, de FCV-01. A figura 6.3 mostra os parâmetros estimados de um teste realizado na planta, com coeficiente de entupimento $k_{e12} = 0,10$, onde não houve variação significativa nos parâmetros a ponto de ser detectada a falha. Mesmo com a ajuda dos parâmetros auxiliares não foi possível a detecção da falha. Este entupimento foi implementado no instante 2.240 segundos.



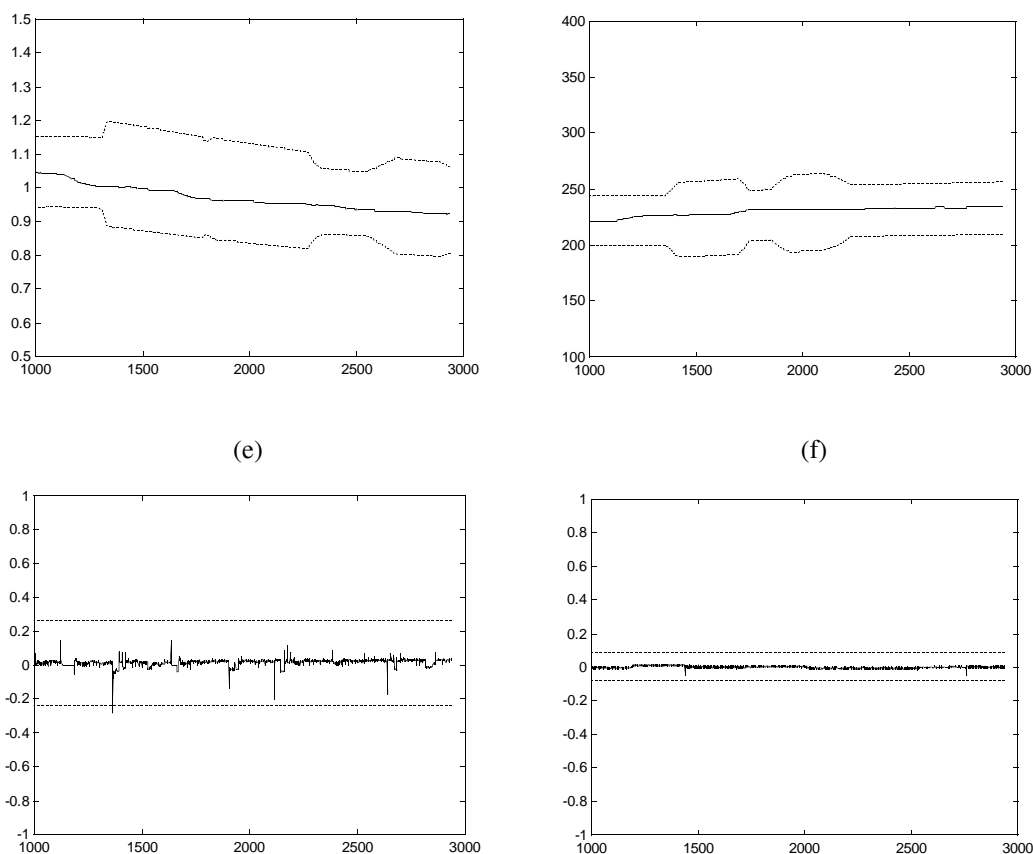
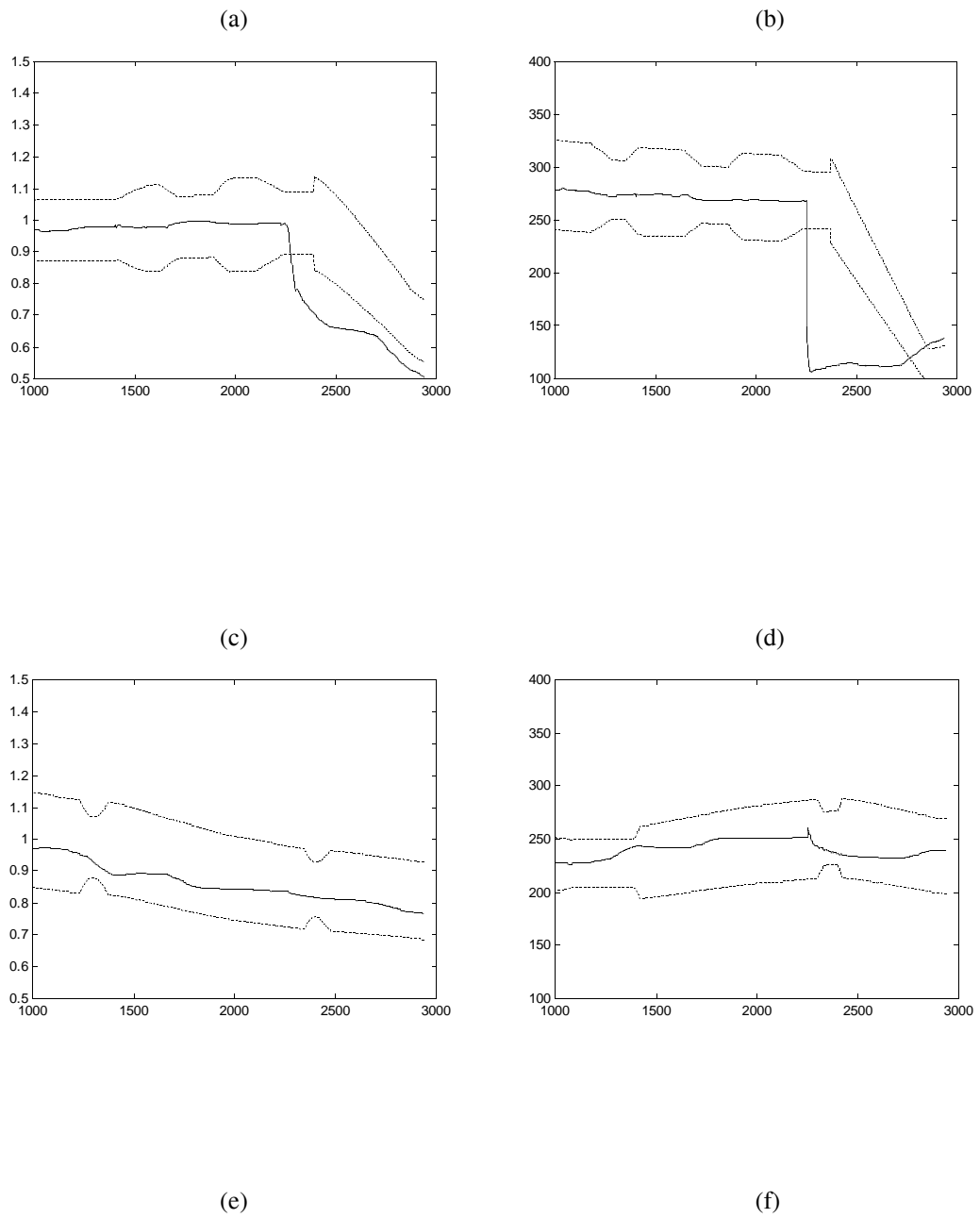


Figura-6.3 - Parâmetros estimados e auxiliares para um entupimento entre TQ-01 e TQ-02.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

A não detecção da falha no teste anterior se deve ao fato de que o estrangulamento executado na válvula FV-AQ não foi suficiente para provocar uma redução de vazão na entrada de TQ-02. O processo não sente entupimentos de pequena intensidade porque a vazão entre TQ-01 e TQ-02 não sofre alterações (ver figura 6.3.e). Com isso, tanto o processo quanto os parâmetros permanecem inalterados.

Para entupimentos de maior intensidade, tanto os parâmetros estimados (K_{qi} , Rh_2 , K_{qo} e Rh_3), quanto os parâmetros auxiliares (dq_i e dq_o), se comportam de forma a permitir a detecção da falha. O parâmetro dq_i , que mede a diferença entre a vazão real e a vazão calculada, normalmente é quem detecta este tipo de falha, mas não necessariamente. Era de se esperar que além do parâmetro dq_i , somente o parâmetro K_{qi} sofresse alteração. Os testes realizados mostraram que a única coisa que se pode afirmar é a variação do parâmetro dq_i . Os parâmetros estimados variam, mas não de forma única. A cada teste realizado, os parâmetros mostraram comportamentos diferentes. A figura 6.4 mostra o resultado de um teste, realizado na planta de tanques interativos, implementando-se o

entupimento no duto de entrada de TQ-02, com constante de entupimento $k_{e12} = 0,75$, tempo de detecção da falha em 12 segundos, por dq_i , e instante de implementação da falha em 2.240 segundos. Observa-se na figura 6.4 que K_{qi} e dq_i variaram conforme se previa, mas Rh_2 também variou, o que não era esperado. Quando o grau de entupimento cresce, os parâmetros K_{qo} e Rh_3 também tendem a variar bastante.



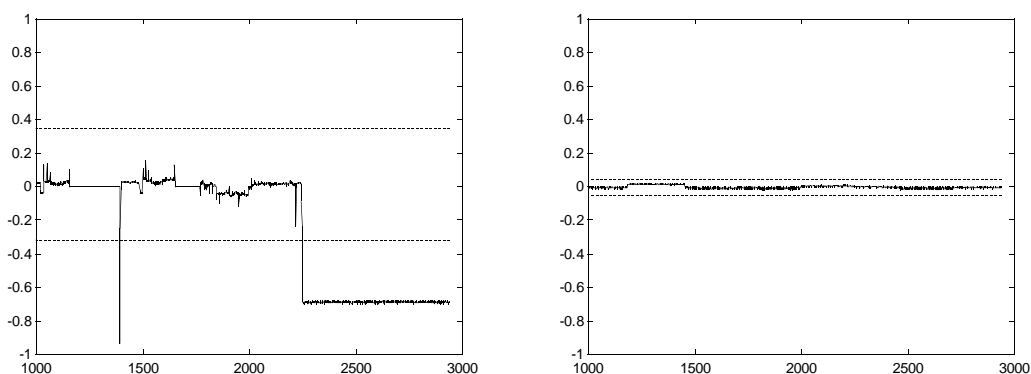


Figura-6.4 - Parâmetros estimados e auxiliares para um entupimento entre TQ-01 e TQ-02.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.4 - Entupimento no Duto Entre TQ-03 e TQ-01

Este entupimento é realizado na planta de tanques interativos através da válvula FV-07. Durante o funcionamento normal do processo, esta válvula permanece aberta. Com o fechamento total ou parcial da válvula FV-07 pode-se simular o entupimento no duto entre TQ-03 e TQ-01. A relação entre o número de voltas de FV-07 e a constante de entupimento k_{e31} do modelo matemático de falhas do STI é apresentada na tabela 6.4 e foi determinada em (Pereira, 1996). A implementação desta falha é também considerada de forma brusca. Os comentários no item 6.2.1 sobre a abertura brusca da válvula FV-05 são válidos também para o fechamento da válvula FV-07.

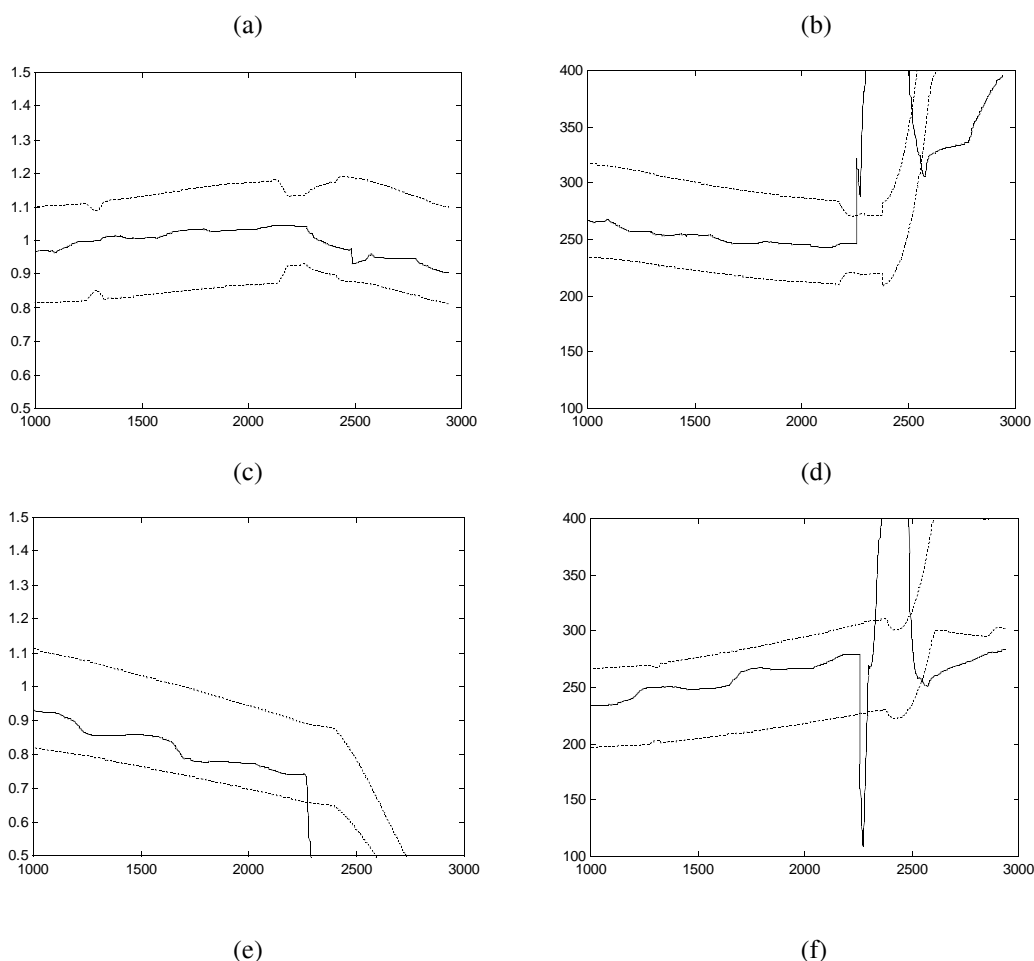
Tabela-6.4 - Relação entre o número de voltas em FV-07 e k_{e31} (Pereira, 1996).

<i>Voltas em FV-07</i>	k_{e31}
5,0	0,11
5,25	0,25
5,5	0,79
6,0	1,0

Na ocorrência desta falha, a malha de vazão é diretamente afetada. O controlador tenderá a compensar este entupimento abrindo mais a válvula FCV-02. Se a vazão máxima após o entupimento for inferior à vazão desejada no *set-point*, a malha de vazão

não será mais controlável. Se entupimento não for total, a malha de nível ainda assim poderá ser controlada. Para entupimentos de pequena intensidade, a vazão de saída do tanque TQ-03 não se altera, do mesmo modo que a vazão de entrada de TQ-02 não se altera para pequenos entupimentos na linha entre TQ-01 e TQ-02 (ver item 6.2.3). Neste caso, tanto os parâmetros estimados quanto os parâmetros auxiliares não são capazes de detectar falha no processo. Para entupimento de maior intensidade, a detecção de falhas, normalmente é feita através do parâmetro dq_o . Os parâmetros K_{qi} e K_{qo} se comportaram da forma esperada, com K_{qi} permanecendo constante após a falha e K_{qo} reduzindo seu valor. Os parâmetros Rh_2 e Rh_3 deveriam também permanecer constantes, mas se comportaram de forma instável nos vários testes realizados.

A figura 6.5 mostra os parâmetros para um teste realizado no STI, com constante de entupimento $k_{e31} = 0,79$, detecção da falha em 8 segundos por dq_o , e instante de implementação da falha em 2.250 segundos.



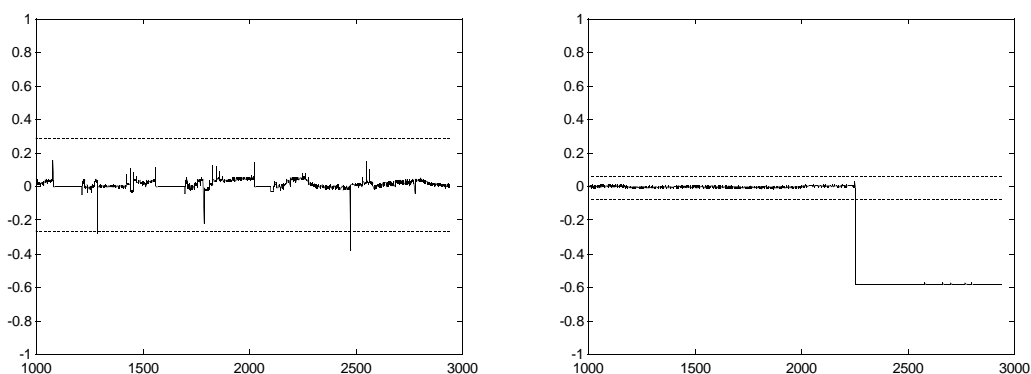


Figura-6.5 - Parâmetros estimados e auxiliares para um entupimento entre TQ-03 e TQ-01.
a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.5 - Falha na Válvula FCV-01

A falha na válvula FCV-01 é considerada como um agarramento numa determinada posição, não respondendo mais aos sinais de controle. Esta falha é implementada na planta através do painel de controle. O comando da válvula fica no modo manual e o operador, via painel de operação, fixa a abertura da válvula. Na implementação desta falha, dois casos distintos podem ocorrer. No primeiro caso, a vazão fixa de entrada em TQ-02 sendo menor que a vazão de saída de TQ-03, faz com que o nível do tanque TQ-03 diminua. Se o nível do tanque TQ-03 alcançar o valor mínimo, a malha de vazão também fica comprometida, pois o intertravamento do CLP desligará a bomba BA-02. No segundo caso, a vazão fixa de entrada em TQ-02 sendo maior que a vazão de saída de TQ-03 faz com que o nível do tanque TQ-03 aumente e, conseqüentemente, o intertravamento do CLP fará desligar a bomba BA-01 para não haver transbordamento dos tanques.

A figura 6.6 mostra os parâmetros estimados de um teste que implementa a falha na válvula FCV-01. A falha foi executada no instante 2240 segundos, com a detecção da falha em 29 segundos por dq_i , e vazão de entrada de TQ-02 fixada em 9,72% da vazão máxima original. Observa-se que, com a redução da vazão máxima de entrada em TQ-02, o valor do parâmetro K_{qi} também foi reduzido, como era de se esperar. Os demais parâmetros estimados (Rh_2 , K_{qo} e Rh_3) mostraram-se inconsistentes, pois não deveriam variar muito após a detecção da falha, já que não estão diretamente relacionados com a vazão de entrada de TQ-02. O parâmetro auxiliar dq_i acusou a falha corretamente.

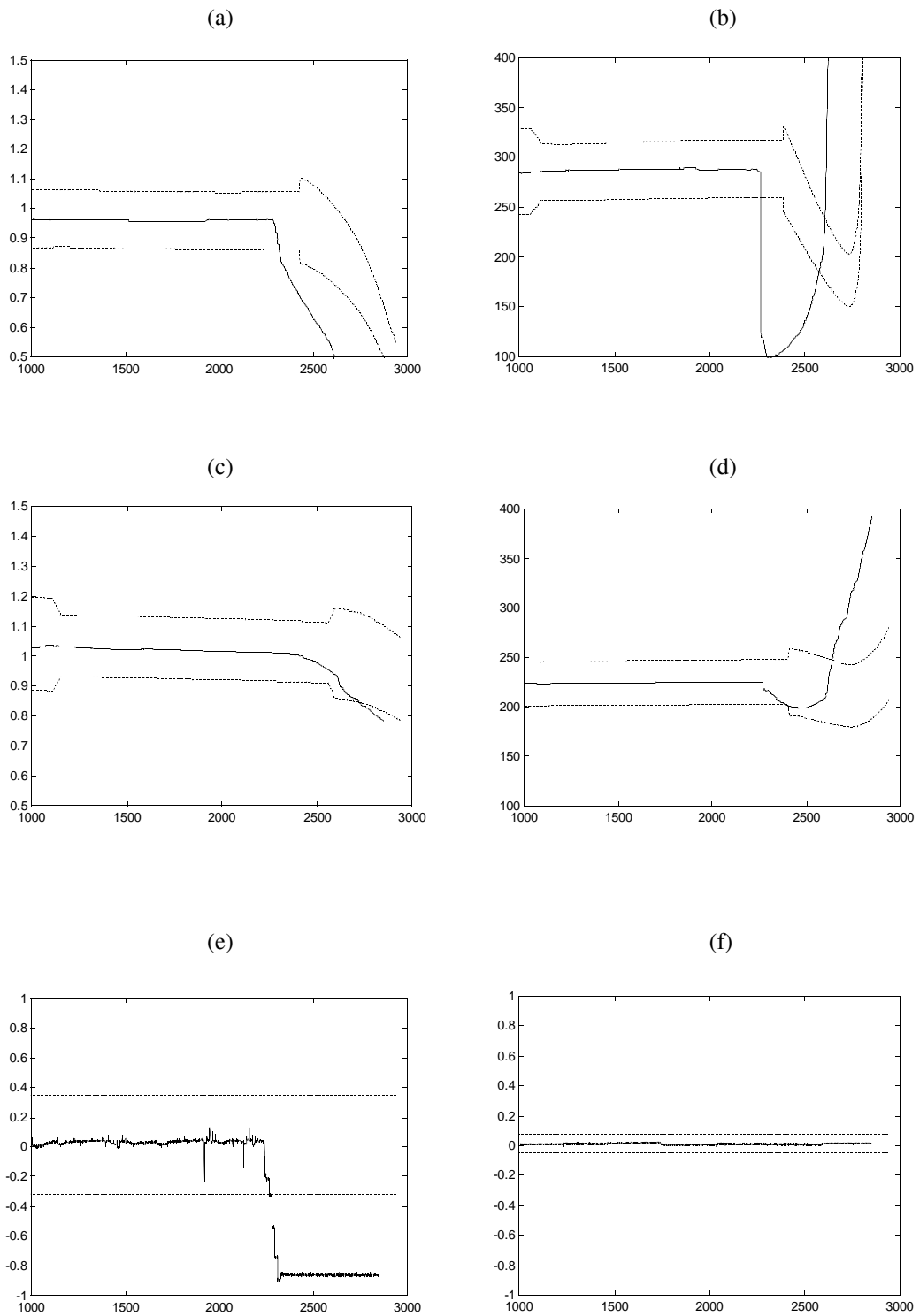


Figura-6.6 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha na válvula FCV-01.
a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

Em outros testes realizados, com a vazão de entrada de TQ-02 fixa em valores próximos a 50%, o parâmetro K_{qi} não mostrou variações significativas, enquanto que o parâmetro

Rh_2 variou bastante. Novamente, o parâmetro dq_i foi o responsável pelas detecções das falhas implementadas.

6.2.6 - Falha na Válvula FCV-02

A falha na válvula FCV-02, a exemplo da falha em FCV-01, é considerada como um agarramento da válvula numa determinada posição, não respondendo mais aos sinais de controle. Esta falha também é implementada na planta através do painel de controle, do mesmo modo que a falha na válvula FCV-01 (ver item 6.2.5). Geralmente neste tipo de falha, a malha de nível permanece controlável, a menos que a vazão fixa de saída de TQ-03 se torne nula. A vazão de entrada em TQ-02 tende a diminuir ou aumentar em relação à situação normal de operação, dependendo da vazão fixa de saída de TQ-03, para tentar manter o nível no *set-point* desejado.

Quanto aos parâmetros estimados, eles mantêm o comportamento como esperado, com exceção do parâmetro Rh_3 , que não mostrou coerência consigo mesmo entre os vários testes realizados. Em alguns testes, após a detecção da falha, o parâmetro Rh_3 aumentava seu valor, enquanto que em outros testes, este mesmo parâmetro obtinha um valor reduzido. Os parâmetros K_{qi} e Rh_2 mantiveram-se constantes e o parâmetro K_{qo} teve seu valor reduzido após a ocorrência da falha.

Os resultados de um teste típico, realizado na planta do STI, são mostrados na figura 6.7. O instante de implementação da falha é 2.240 segundos, com detecção de falha em 5 segundos por dq_o , sendo que a vazão de saída de TQ-03 foi fixada em 56,8% de sua vazão máxima. Observa-se que este valor fixo de vazão está na faixa dos *set-points* implementados na planta, ou seja, entre 40% e 60%. Isto pode explicar o motivo pelo qual o parâmetro K_{qo} não teve uma variação muito significativa, pois esperava-se que sua variação fosse maior, como aconteceu em outros testes deste tipo de falha.

(a)

(b)

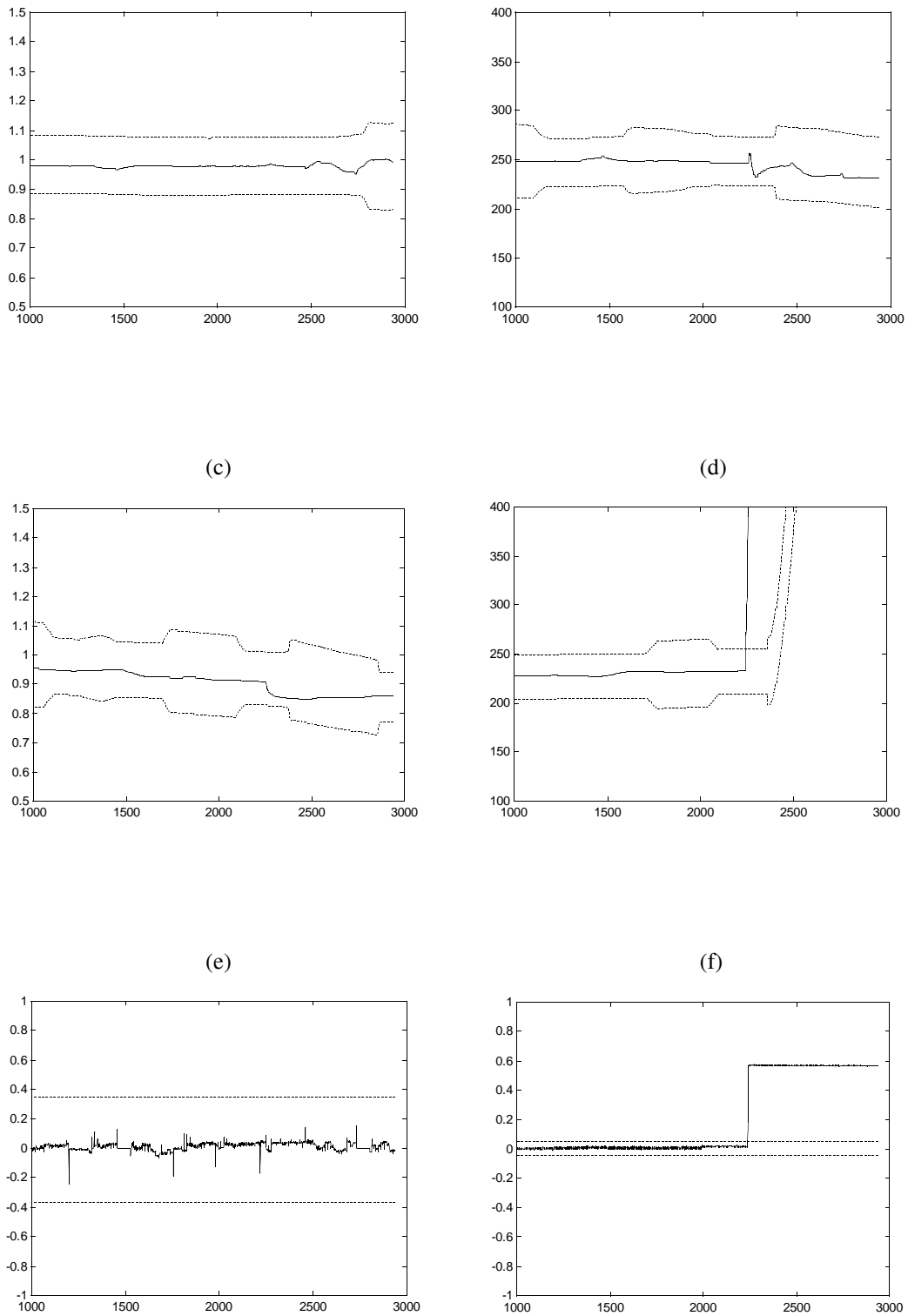
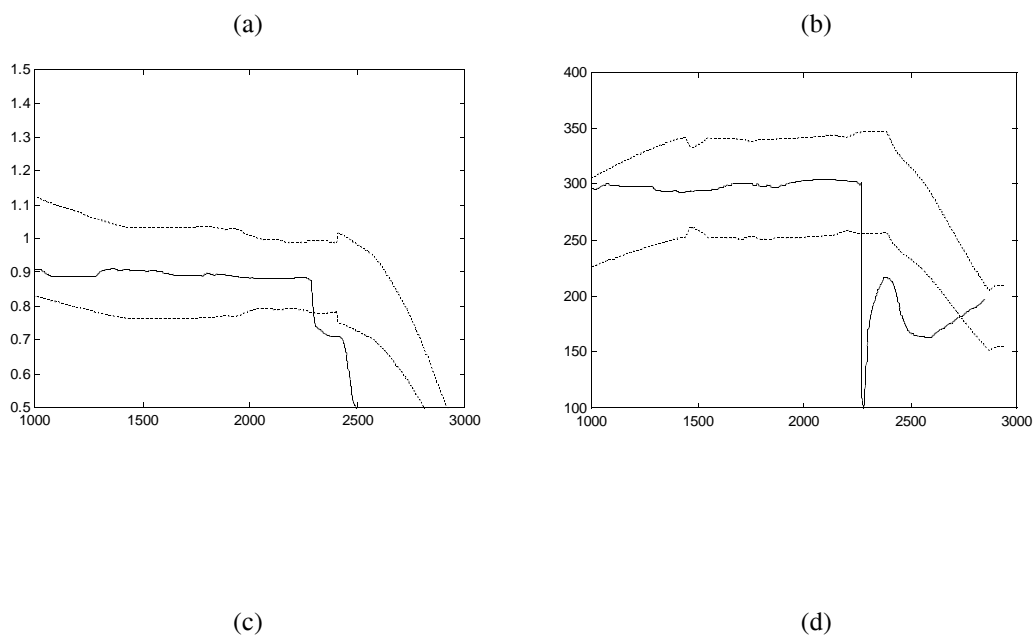


Figura-6.7 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha na válvula FCV-02.
a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.7 - Falha na Bomba BA-01

A falha na bomba BA-01 que será considerada é a interrupção total de seu funcionamento. Esta falha é realizada na prática, desligando-se a bomba no painel de controle. Conseqüentemente, a vazão de entrada de TQ-02 torna-se nula. A malha de nível deixa de ser controlável e a malha de vazão permanece controlável até o momento em que o nível de TQ-03 atinge o mínimo, fazendo com que o intertravamento do CLP desligue a bomba BA-02. As conseqüências desta falha são as mesmas de um entupimento total entre TQ-01 e TQ-02, e de um agarramento da válvula FCV-01 no final de seu curso provocando uma vazão nula.

A figura 6.8 mostra os parâmetros para um teste realizado na planta do STI, no qual foi implementado uma falha na bomba BA-01. O instante de execução da falha foi 2.240 segundos, com a detecção da falha em 29 segundos por dq_i . Pode-se observar na figura 6.8.e que ocorreu um caso atípico: pouco depois da detecção da falha, o parâmetro dq_i volta a se localizar dentro da faixa de tolerância. Neste momento, a bomba BA-01 continuava desligada. Aconteceu que, coincidentemente, houve uma mudança no *set-point* do nível do tanque TQ-03 e o controlador mandou que se fechasse a válvula FCV-01, para não haver vazão. Os sintomas desta falha foram sentidos mais tarde, quando houve necessidade de que entrasse mais água no tanque TQ-02, fazendo com que dq_i crescesse novamente.



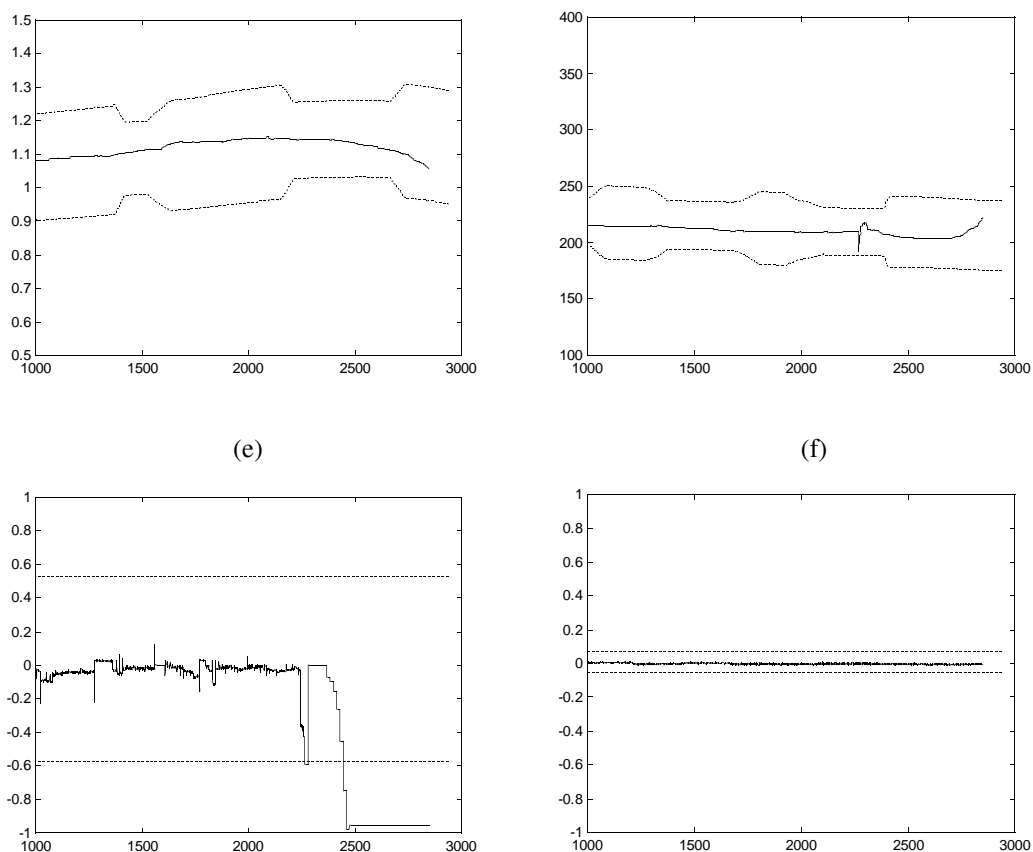


Figura-6.8 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha na bomba BA-01.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

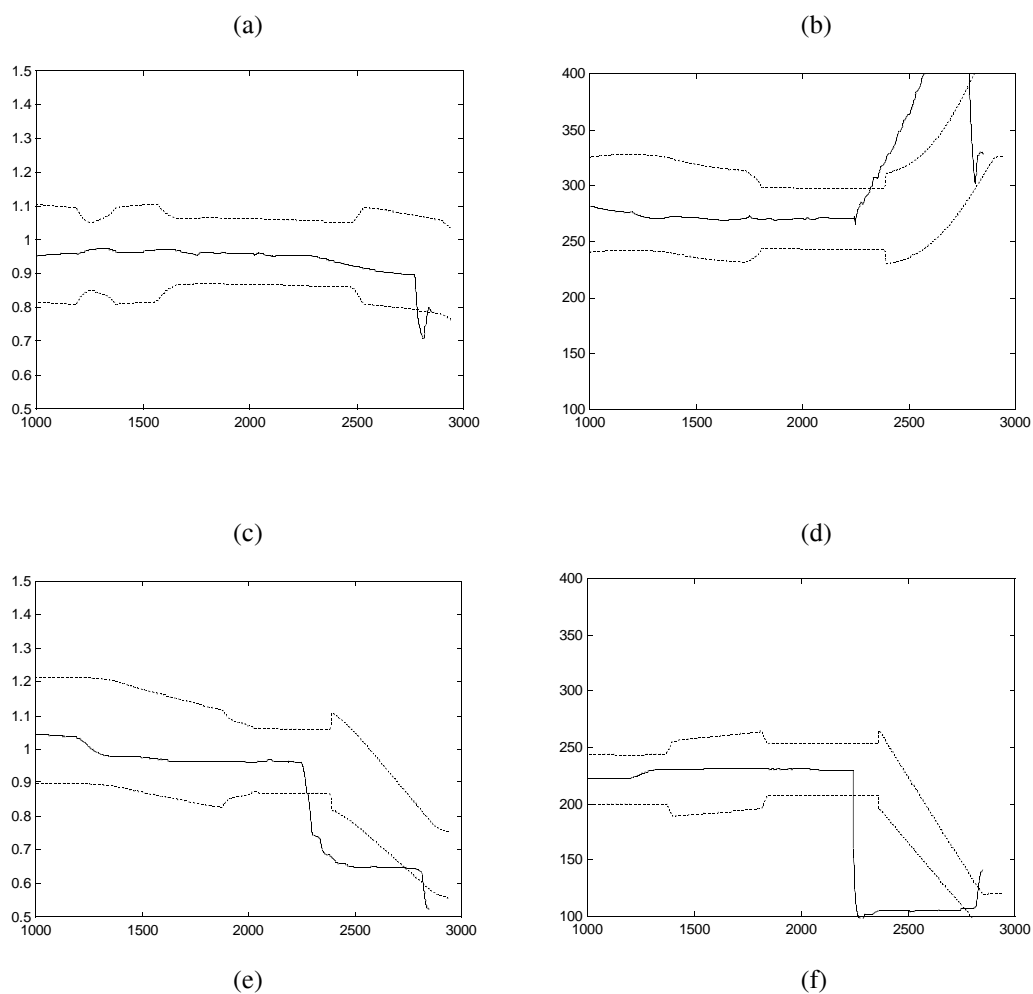
Nos vários testes realizados, o parâmetro K_{qi} comportou-se como era de se esperar, ou seja reduzindo seu valor após a ocorrência da falha. Os demais parâmetros estimados tiveram um comportamento aleatório nos testes após a implementação da falha.

6.2.8 - Falha na Bomba BA-02

A falha na bomba BA-02 também será considerada como sendo a interrupção total no seu funcionamento. Esta falha é implementada do mesmo modo que a falha na bomba BA-01 (ver item 6.2.7). É importante salientar que, neste tipo de falha, a vazão de saída do tanque TQ-03 não necessariamente será nula. Se o nível do tanque TQ-03 estiver acima do ponto de tomada de água da bomba BA-02, por gravidade, haverá circulação de água entre TQ-03 e TQ-01. Esta vazão é dependente do nível do tanque TQ-03 e da abertura da válvula FCV-02. Com isso, a malha de vazão não será mais totalmente controlável, uma vez que a bomba BA-02 não está funcionando e a vazão por diferença

de nível é bem menor, podendo não ser suficiente para alcançar a referência desejada. A malha de nível continua controlável somente enquanto houver alguma vazão de saída de TQ-03.

A figura 6.9 mostra os parâmetros para um teste realizado na planta do STI, no qual foi implementado uma falha na bomba BA-02. A falha foi implementada no instante 2.240 segundos, com a detecção da falha em 5 segundos por dq_o . Neste teste, também ocorreu um caso atípico: os parâmetros estimados e auxiliares se comportavam conforme o previsto até que, por volta de 2.750 segundos, o parâmetro dq_i ultrapassou o limite de tolerância inferior. Não era implementada, naquele momento, nenhuma outra falha no processo, além da falha em BA-02. O que pode ter acontecido é um agarramento, involuntário, da válvula FCV-01 quando o controlador tentava manter o nível sob controle. Embora o algoritmo tenha detectado esta outra falha, ele não está sendo testado para detectar falhas simultâneas no processo.



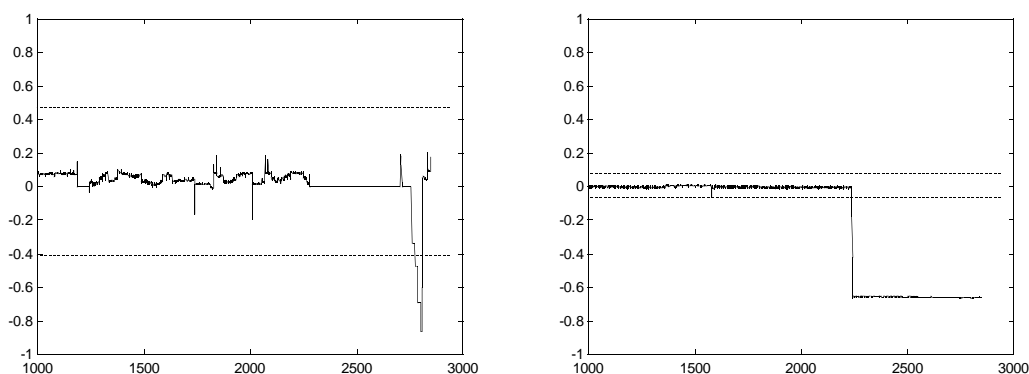


Figura-6.9 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha na bomba BA-02.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

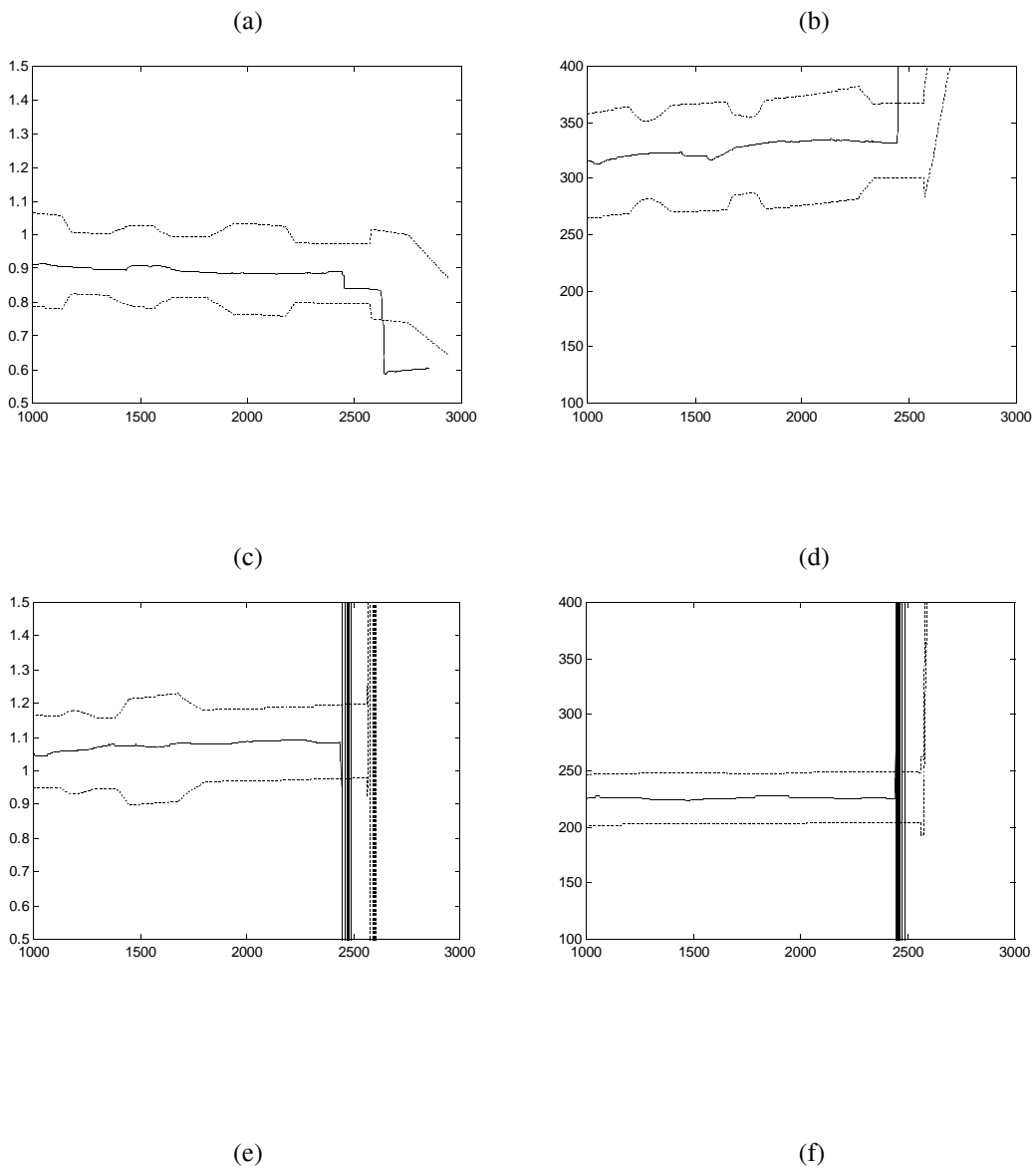
O processo, neste tipo de falha, tem um comportamento semelhante à falha por entupimento entre TQ-03 e TQ-01 e à falha na válvula FCV-02, pois todas estas provocam uma diminuição da vazão de saída de TQ-03. Os parâmetros K_{qi} e K_{qo} mostraram-se coerentes. Nos testes realizados, depois da ocorrência da falha o parâmetro K_{qi} se mantém constante enquanto o parâmetro K_{qo} apresenta redução do seu valor. Os parâmetros Rh_2 e Rh_3 se mostraram inconstantes nos testes realizados.

6.2.9 - Falha no Sensor de Nível LE-01

A falha no sensor de nível LE-01 considerada neste trabalho é a interrupção total do sinal transmitido entre o sensor e o CLP. Com isto, a leitura do sensor de nível LE-01 será nula após a implementação da falha. Isto ocorre porque o CLP não realiza a consistência entre 0 mA (falha) e 4 mA (valor nulo), lembrando que a transmissão dos sinais é feita de 4 mA a 20 mA, sendo 4 mA correspondente ao valor medido zero. A forma de executar esta falha na planta de tanques interativos é a mesma para todas as falhas em sensores implementadas, ou seja, através da desconecção do fio transmissor do sinal junto ao CLP.

O valor do nível do tanque TQ-03 vai a zero durante a ocorrência desta falha, fazendo com que a malha de nível não fique mais controlável. A tendência, nesta situação, é a válvula FCV-01 abrir totalmente para que o valor medido do nível de TQ-03 se iguale ao seu *set-point*. Com isto, o nível real do tanque TQ-03 irá subir até que o intertravamento do CLP desligue a bomba BA-01. Já a malha de vazão permanece inalterada durante esta falha.

A figura 6.10 mostra os parâmetros para este tipo de falha. Nota-se que os parâmetros K_{qo} e Rh_3 se desestabilizaram enquanto que os parâmetros K_{qi} e Rh_2 se modificaram, mas sem significado concreto. O algoritmo de estimação de parâmetros é alimentado com valores de nível de TQ-03 como também de sua derivada. Se de repente estes valores passam a ser nulos, é de se esperar que os parâmetros estimados se comportem de maneira imprevisível. Os parâmetros dq_i e dq_o se comportaram normalmente. A falha, cujos parâmetros foram apresentados na figura 6.10, foi implementada no instante 2.240 segundos, sendo detectada em 13 segundos por K_{qo} .



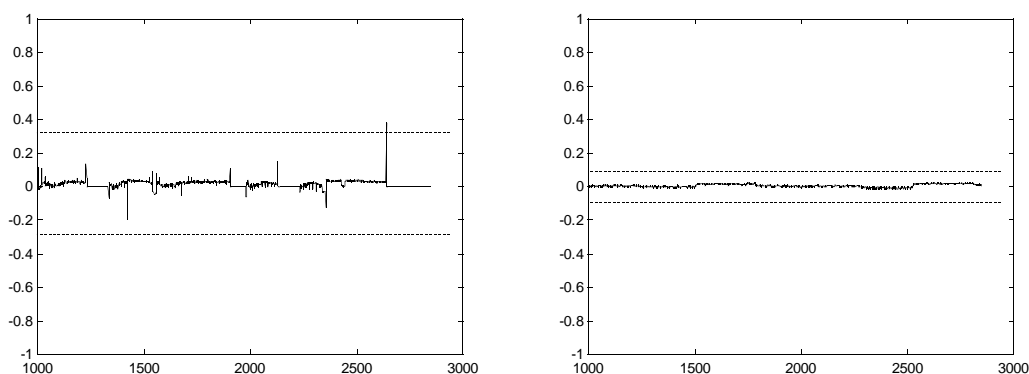


Figura-6.10 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha no sensor LE-01.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.10 - Falha no Sensor de Nível LE-02

A falha no sensor de nível LE-02 considerada neste trabalho também é a interrupção total do sinal transmitido entre o sensor e o CLP. A leitura do sensor de nível LE-02 será nula após a implementação da falha. A forma de executar esta falha na planta de tanques interativos é a mesma do item 6.2.9.

Este tipo de falha provoca danos somente ao algoritmo de DIF. O processo, como não precisa da leitura do nível do tanque TQ-02, não sentirá a falha do sensor LE-02. Os parâmetros estimados K_{qi} e Rh_2 se desestabilizam enquanto que os parâmetros K_{qo} e Rh_3 se modificam sem significado concreto. O motivo para isto é o mesmo do item 6.2.9, ou seja, o algoritmo de estimação de parâmetros necessita dos valores de nível do tanque TQ-02 e de sua derivada. Após a ocorrência desta falha, o processo pode continuar funcionando normalmente, só que não poderá contar com a monitoração do algoritmo de DIF.

A figura 6.11 mostra os parâmetros para este tipo de falha. Nota-se que os parâmetros K_{qi} e Rh_2 se desestabilizaram enquanto que os parâmetros K_{qo} e Rh_3 se modificaram, mas sem significado concreto. Os parâmetros dq_i e dq_o se comportaram normalmente. Esta falha foi implementada no instante 2.310 segundos, sendo detectada em 11 segundos por K_{qi} .

(a)

(b)

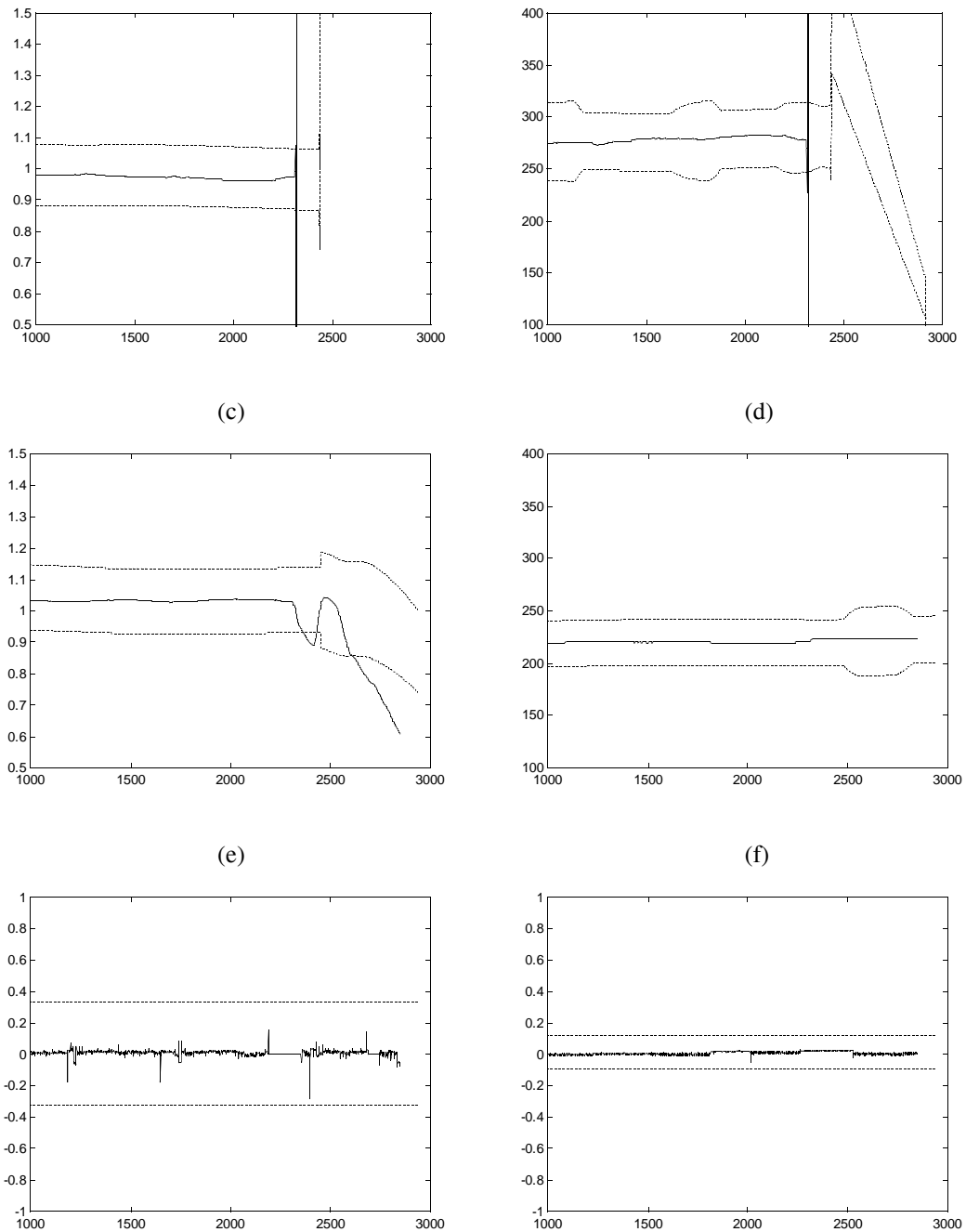


Figura-6.11 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha no sensor LE-02.
 $a-K_{qi}$; $b-Rh_2$; $c-K_{qo}$; $d-Rh_3$; $e-dq_i$; $f-dq_o$.

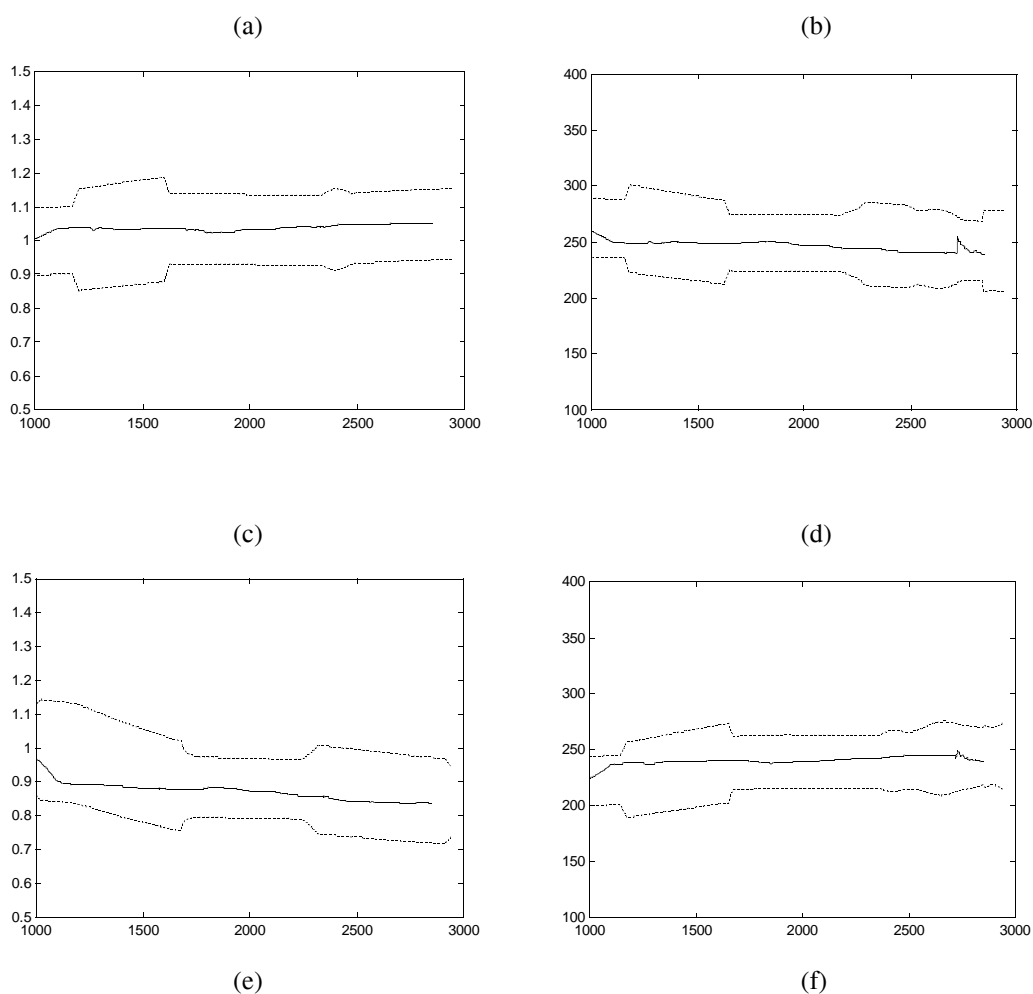
6.2.11 - Falha no Sensor de Vazão FE-01

A falha no sensor de vazão FE-01 considerada neste trabalho também é a interrupção total do sinal transmitido entre o sensor e o CLP. A leitura do sensor de vazão FE-01

será nula após a implementação da falha. A forma de executar esta falha na planta de tanques interativos é a mesma do item 6.2.9.

Este tipo de falha, assim como a falha no sensor de nível LE-02, não interfere no bom funcionamento do processo. Para o algoritmo de estimação de parâmetros também não interfere pois esta leitura não é utilizada, a menos no instante em que o parâmetro auxiliar acusa a falha e há o *reset* nas matrizes de covariância P_2 e P_3 . Neste momento os parâmetros estimados sofrem uma pequena perturbação mas voltam em seguida às suas condições normais. Este tipo de falha permite que o processo continue funcionando normalmente, e o algoritmo de DIF poderá também funcionar, só que sem a ajuda do parâmetro auxiliar dq_i .

A figura 6.12 mostra os parâmetros para uma falha deste tipo, implementada no instante 2.770 segundos, sendo detectada em 5 segundos por dq_i . Nota-se que os parâmetros estimados se comportam normalmente após a ocorrência da falha, menos os parâmetros Rh_2 e Rh_3 que oscilam um pouco quando acontece a detecção da falha.



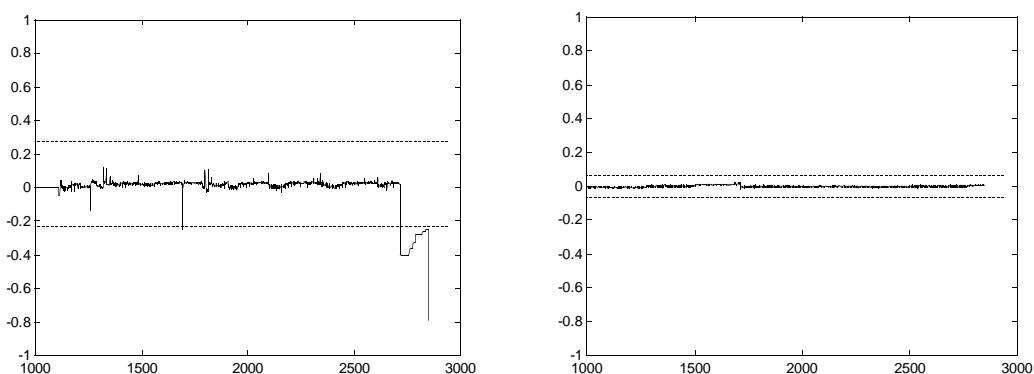


Figura-6.12 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha no sensor FE-01.
 a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.2.12 - Falha no Sensor de Vazão FE-02

A falha no sensor de vazão FE-02 considerada neste trabalho também é a interrupção total do sinal transmitido entre o sensor e o CLP. A leitura do sensor de vazão FE-02 será nula após a implementação da falha. A forma de executar esta falha na planta de tanques interativos é a mesma do item 6.2.9.

A falha neste sensor prejudica totalmente a malha de vazão. O controlador irá fazer com que a válvula FCV-02 se abra totalmente para tentar fazer com que a vazão medida seja igual à referência. A malha de nível permanecerá controlável. A válvula FCV-01 irá se abrir mais para compensar a abertura total da válvula FCV-02. Para o algoritmo de estimação de parâmetros, esta falha é prejudicial somente quando o parâmetro dq_o ultrapassa o limite de tolerância inferior e detecta a falha, fazendo com que ocorra um *reset* nas matrizes de covariância P_2 e P_3 e provocando uma pequena perturbação nos parâmetros. Logo em seguida, os parâmetros estimados voltam às condições normais.

A figura 6.13 mostra os parâmetros para uma falha deste tipo, implementada no instante 2.240 segundos, sendo detectada em 10 segundos por dq_o . Nota-se que os parâmetros estimados se comportam normalmente após a ocorrência da falha, menos os parâmetros Rh_2 e Rh_3 que oscilam um pouco quando acontece a detecção da falha.

(a)

(b)

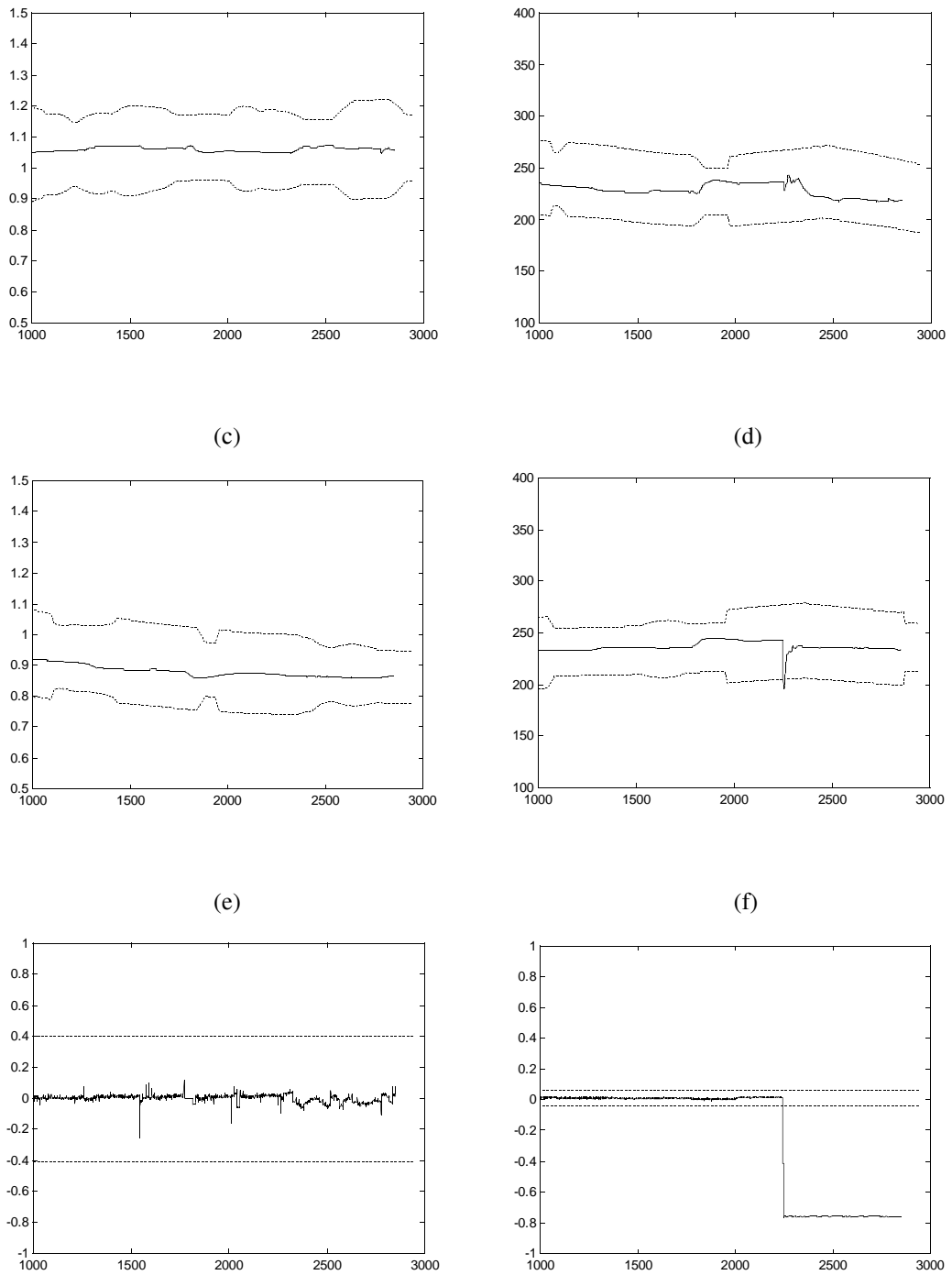


Figura-6.13 - Parâmetros estimados e auxiliares para uma falha no sensor FE-02.

a- K_{qi} ; b- Rh_2 ; c- K_{qo} ; d- Rh_3 ; e- dq_i ; f- dq_o .

6.3 - Isolação de Falhas

São apresentadas na próxima seção as regras lógicas utilizadas para se efetuar a isolação de falhas. Estas regras lógicas constituem um conjunto de procedimentos capazes de fornecer informações a respeito da localização e da intensidade da falha. Alguns exemplos de procedimentos lógicos para isolação de falhas podem ser obtidos em (DeLaat & Merrill, 1990; Isermann, 1993; Howell, 1994; Koscielny, 1995; Sampath et al., 1995). Estes procedimentos foram determinados após a observação dos resultados dos testes realizados na planta. Algumas falhas possuem sintomas e conseqüências semelhantes, não sendo possível dizer exatamente qual é a falha que está ocorrendo. Para estes casos, o algoritmo tentará separar um grupo de falhas prováveis para que o operador, através de outros recursos, possa tentar isolar a falha. Além de isolar a falha, o algoritmo será capaz de quantificar a falha em SUAVE, MÉDIA ou GRAVE.

A isolação das falhas não pode ser feita no instante em que é detectada. Pode-se observar nos resultados gráficos apresentados no item 6.2, que os parâmetros estimados não possuem consistência suficiente no momento em que é feita a detecção da falha. Os parâmetros e o processo começam a ser analisados imediatamente à detecção da falha e o resultado do diagnóstico é dado 120 segundos após. Este tempo é necessário para se evitar diagnósticos errados, e foi determinado empiricamente através da observação de que os parâmetros possuem um comportamento já relativamente estável neste instante. Valores menores que 120 segundos podem ocasionar isolações de falhas incorretas. Na seção 6.3.1 são apresentados os sintomas a serem observados para que se possa fazer a isolação das falhas. Estes sintomas são discutidos na ordem hierárquica do método de isolação de falhas. A seção 6.3.2 traz um fluxograma para ilustrar o procedimento de isolação de falhas. É importante salientar que as regras estabelecidas neste item não estão aptas a isolar duas ou mais falhas que ocorram simultaneamente.

6.3.1 - Sintomas a Serem Observados

1º - Comportamento dos parâmetros auxiliares dq_i e dq_o

- *dq_i aumenta:* se dq_i aumenta e ultrapassa o limite de tolerância superior significa que a vazão medida de entrada de TQ-02 é maior que a vazão calculada pelo polinômio qi_{pol} (ver seção 5.3.6). Isto acontece, por exemplo quando a válvula FCV-01 agarra numa posição que permite uma vazão maior do que a vazão requerida pelo controlador, ou seja, o sinal de controle tenta diminuir a vazão. Para esta situação, a única falha possível é o **agarramento**

da válvula FCV-01. Se a média de dq_i nos últimos 120 segundos for inferior a 0,5 a falha será considerada SUAVE; se estiver entre 0,5 e 0,7 será considerada MÉDIA; e se for superior a 0,7 será considerada GRAVE. É normal os limites de tolerância do parâmetro dq_i , em alguns testes, atingirem +/- 0,5, por isso a média de dq_i estando abaixo deste valor será considerada como falha SUAVE. O valor 0,7 representa um valor, acima do qual, o nível dos tanques TQ-02 e TQ-03 poderão se elevar rapidamente, pois estará entrando muito mais água em TQ-02 do que saindo em TQ-03.

- dq_i diminui: se dq_i diminui e ultrapassa o limite de tolerância inferior significa que a vazão medida de entrada de TQ-02 é menor que a vazão calculada pelo polinômio qi_{pol} (ver seção 5.3.6). Isto acontece quando o controlador está tentando aumentar a vazão e o sinal medido fornece uma leitura de vazão inferior à que deveria ser. Para esta situação, quatro falhas são possíveis: entupimento no duto entre TQ-01 e TQ-02; falha na bomba BA-01; falha no sensor FE-01; e agarramento da válvula FCV-01. Outros sintomas podem ainda ser analisados.
- dq_o aumenta: se dq_o aumenta e ultrapassa o limite de tolerância superior significa que a vazão medida de saída de TQ-03 é maior que a vazão calculada pelo polinômio qo_{pol} (ver seção 5.3.6). Isto acontece quando a válvula FCV-02 agarra numa posição que permite uma vazão maior do que a vazão requerida pelo controlador, ou seja, o sinal de controle tenta diminuir a vazão. Para esta situação, a única falha possível é o **agarramento da válvula FCV-02**. Se a média de dq_o nos últimos 120 segundos for inferior a 0,2 a falha será considerada SUAVE; se estiver entre 0,2 e 0,6 será considerada MÉDIA; e se for superior a 0,6 será considerada GRAVE. É normal os limites de tolerância do parâmetro dq_o , em alguns testes, atingirem +/- 0,2, por isso a média de dq_o estando abaixo deste valor será considerada como falha SUAVE. O valor 0,6 representa um valor, acima do qual, não poderá haver nenhum *set-point* de vazão, por isso, se o controlador estiver mandando fechar a válvula FCV-02 e o parâmetro dq_o estiver acima deste valor significa que a vazão de saída de TQ-03 estará fora do limite máximo para variação do *set-point*, que é de 60%.
- dq_o diminui: se dq_o diminui e ultrapassa o limite de tolerância inferior significa que a vazão medida de saída de TQ-03 é menor que a vazão calculada pelo polinômio qo_{pol} (ver seção 5.3.6). Isto acontece quando o controlador está tentando aumentar a vazão e o sinal medido fornece uma

leitura de vazão inferior a que deveria ser. Para esta situação, quatro falhas são possíveis: entupimento no duto entre TQ-03 e TQ-01; falha na bomba BA-02; falha no sensor FE-02; e agarramento da válvula FCV-02. Outros sintomas podem ainda ser analisados.

- dq_i e dq_o continuam normais: se dq_i e dq_o não saíram da faixa de tolerância significa que não há problemas relacionados com as vazões de entrada de TQ-02 e nem de saída de TQ-03. A partir desta informação, deve-se verificar quatro possíveis falhas: entupimento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03; vazamento no duto entre os tanques TQ-02 e TQ-03; falha no sensor LE-01; e falha no sensor LE-02. Outros sintomas podem ainda ser analisados.

2º - Comportamento das vazões de entrada em TQ-02 e de saída em TQ-03

- vazão de entrada de TQ-02 maior que 10% de $Q_{i,max}$: se o parâmetro dq_i diminuiu e a média da vazão de entrada de TQ-02 nos últimos 30 segundos foi maior que 10% de $Q_{i,max}$, dois tipos de falhas podem ocorrer: **entupimento parcial entre TQ-01 e TQ-02; e agarramento da válvula FCV-01 numa posição que permite uma vazão de intensidade baixa até média**. Se a média de dq_i nos últimos 120 segundos for inferior a 0,5 a falha será considerada SUAVE; se estiver entre 0,5 e 0,7 será considerada MÉDIA; e se for superior a 0,7 será considerada GRAVE.
- vazão de entrada de TQ-02 menor que 10% de $Q_{i,max}$: se o parâmetro dq_i diminuiu e a média da vazão de entrada de TQ-02 nos últimos 30 segundos foi menor que 10% de $Q_{i,max}$, quatro tipos de falhas podem ocorrer: entupimento total, ou quase, entre TQ-01 e TQ-02; agarramento da válvula FCV-01 numa posição que permite uma vazão muito pequena; falha na bomba BA-01; e falha no sensor FE-01. Outros sintomas podem ainda ser analisados.
- vazão de saída de TQ-03 maior que 10% de $Q_{o,max}$: se o parâmetro dq_o diminuiu e a média da vazão de saída de TQ-03 nos últimos 30 segundos foi maior que 10% de $Q_{o,max}$, três tipos de falhas podem ocorrer: **entupimento parcial entre TQ-03 e TQ-01; agarramento da válvula FCV-02 numa posição que permite uma vazão de intensidade baixa até média; e falha na bomba BA-02 se o nível de TQ-03 estiver acima do ponto de tomada de água da bomba BA-02**. Se a média de dq_o nos últimos 120 segundos for

inferior a 0,2 a falha será considerada SUAVE; se estiver entre 0,2 e 0,6 será considerada MÉDIA; e se for superior a 0,6 será considerada GRAVE.

- vazão de saída de TQ-03 menor que 10% de $Q_{o_{max}}$: se o parâmetro dq_o diminuiu e a média da vazão de saída de TQ-03 nos últimos 30 segundos foi menor que 10% de $Q_{o_{max}}$, quatro tipos de falhas podem ocorrer: entupimento total, ou quase, entre TQ-03 e TQ-01; agarramento da válvula FCV-02 numa posição que permite uma vazão muito pequena; falha na bomba BA-01 se o nível de TQ-03 estiver abaixo do ponto de tomada de água da bomba BA-02; e falha no sensor FE-02. Outros sintomas podem ainda ser analisados.
- medição de LE-01 nula: se os parâmetros dq_i e dq_o continuaram normais após a detecção da falha e a medição de LE-01 tornou-se nula, a única falha que pode estar ocorrendo é: **falha no sensor de nível LE-01**. Este tipo de falha é considerada falha GRAVE, pois a malha de nível ficará totalmente descontrolada, fazendo com que o nível de TQ-03 suba até que o intertravamento do CLP desligue a bomba BA-01.
- medição de LE-02 nula: se os parâmetros dq_i e dq_o continuaram normais após a detecção da falha e a medição de LE-02 tornou-se nula, a única falha que pode estar ocorrendo é: **falha no sensor de nível LE-02**. Este tipo de falha é considerada falha MÉDIA, pois a leitura do nível do tanque TQ-02 não é necessária para o controle do processo, mas por sua vez, o algoritmo de DIF fica totalmente prejudicado.

3º - Comportamento dos parâmetros estimados

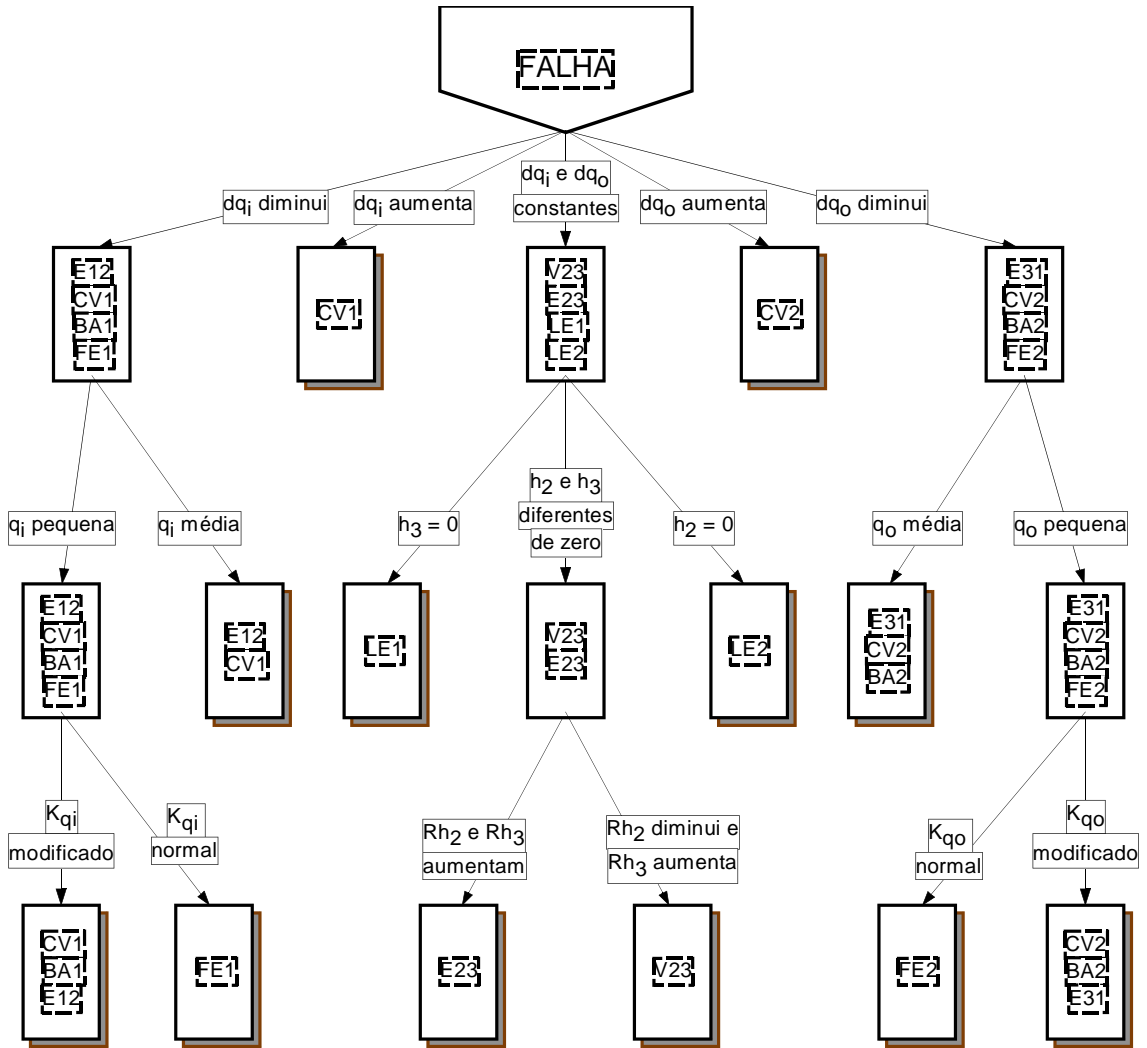
- K_{qi} não varia: se o parâmetro dq_i diminuiu, a média da vazão de entrada de TQ-02 nos últimos 120 segundos foi menor que 10% de $Q_{i_{max}}$ e o parâmetro K_{qi} se manteve normal, a única falha que pode ter ocorrido é: **falha no sensor de vazão FE-01**. Esta falha é classificada como falha SUAVE, pois a leitura de vazão entre TQ-01 e TQ-02 não é necessária para o controle do processo, e prejudica pouco o sistema de DIF (ver comentários na seção 6.2.11).
- K_{qi} varia: se o parâmetro dq_i diminuiu, a média da vazão de entrada de TQ-02 nos últimos 120 segundos foi menor que 10% de $Q_{i_{max}}$ e o parâmetro K_{qi} diminuiu, três falhas podem ter ocorrido: **falha na bomba BA-01; entupimento total, ou quase, entre TQ-01 e TQ-02; e agarramento da válvula FCV-01 numa posição que permite uma vazão muito pequena.**

Esta falha é classificada como falha GRAVE, pois provoca uma redução total, ou quase, da vazão entre TQ-01 e TQ-02.

- K_{qo} não varia: se o parâmetro dq_o diminuiu, a média da vazão de saída de TQ-03 nos últimos 120 segundos foi menor que 10% de $Q_{o_{max}}$ e o parâmetro K_{qo} se manteve normal, a única falha que pode ter ocorrido é: **falha no sensor de vazão FE-02**. Esta falha é classificada como falha GRAVE, pois a leitura da vazão entre TQ-03 e TQ-01 afeta diretamente a malha de vazão.
- K_{qo} varia: se o parâmetro dq_o diminuiu, a média da vazão de saída de TQ-03 nos últimos 120 segundos foi menor que 10% de $Q_{o_{max}}$ e o parâmetro K_{qo} diminuiu, três falhas podem ter ocorrido: **falha na bomba BA-02; entupimento total, ou quase, entre TQ-03 e TQ-01; e agarramento da válvula FCV-02 numa posição que permite uma vazão muito pequena**. Esta falha é classificada como falha GRAVE, pois provoca uma redução total, ou quase, da vazão entre TQ-03 e TQ-01, afetando diretamente a malha de vazão.
- Rh_2 e Rh_3 aumentam: se os parâmetros dq_i e dq_o continuaram dentro das respectivas faixas de tolerância, as medições dos sensores LE-01 e LE-02 não são nulas e os parâmetros Rh_2 e Rh_3 aumentaram é sinal de que há um **entupimento entre TQ-02 e TQ-03**. Se as médias de Rh_2 e Rh_3 nos últimos 30 segundos forem inferiores a 400 a falha será considerada SUAVE; se estiverem entre 400 e 1.000 será considerada MÉDIA; e se forem superiores a 1.000 será considerada GRAVE. Estes valores, 400 e 1.000, foram determinados observando-se os parâmetros nos testes realizados para diferentes intensidades de falha. A classificação das falhas foi definida de acordo com a constante de entupimento k_{e23} implementada nos testes e observando-se o comportamento destes parâmetros.
- Rh_2 diminui e Rh_3 aumenta: se os parâmetros dq_i e dq_o continuaram dentro das respectivas faixas de tolerância, as medições dos sensores LE-01 e LE-02 não são nulas, o parâmetro Rh_2 diminuiu e o parâmetro Rh_3 aumentou é sinal de que há um **vazamento entre TQ-02 e TQ-03**. Se a média de Rh_3 nos últimos 30 segundos for inferior a 600 a falha será considerada SUAVE; se estiver entre 600 e 1.000 será considerada MÉDIA; e se for superior a 1.000 será considerada GRAVE. Estes valores, 600 e 1.000, foram determinados observando-se o parâmetro Rh_3 nos testes realizados para diferentes intensidades de falha. A classificação das falhas foi definida de acordo com a

constante de vazamento k_{v23} implementada nos testes e observando-se o comportamento deste parâmetro.

6.3.2 - Fluxograma do Método de Isolação de Falhas



Legenda:

- E12 - entupimento entre TQ-01 e TQ-02
- E23 - entupimento entre TQ-02 e TQ-03
- E31 - entupimento entre TQ-03 e TQ-01
- V23 - vazamento entre TQ-02 e TQ-03
- CV1 - agarramento de FCV-01
- CV2 - agarramento de FCV-02
- BA1 - falha em BA-01
- BA2 - falha em BA-02
- LE1 - falha em LE-01
- LE2 - falha em LE-02
- FE1 - falha em FE-01
- FE2 - falha em FE-02

6.4 - Comentários Finais

O tempo de detecção de falhas, de um modo geral, foi bom. Os parâmetros auxiliares dq_i e dq_o contribuíram de maneira eficiente para que o tempo de detecção de falhas diminuísse, pois fazem uma comparação direta entre o valor medido e o valor calculado (ver seção 5.3.6). Falhas nos sensores foram detectadas mais rapidamente que as falhas no processo. A velocidade de detecção das falhas foi diretamente proporcional ao dano que estas falhas provocariam no processo. Falhas de pequena intensidade tiveram um tempo de detecção maior que as falhas de grande intensidade, como esperado. Outro fator importante para o tempo de detecção de falhas é a condição do processo no momento em que ocorre a falha. Se por exemplo, implementa-se um entupimento num duto qualquer no instante em que a vazão neste duto, por ação do controlador, for muito pequena ou nula, a detecção desta falha só irá ocorrer quando o controlador exigir que haja vazão.

O número de alarmes falsos foi razoável. Houve 6 alarmes falsos nos 41 testes realizados. O algoritmo de isolação de falhas não conseguiu classificar estes 6 testes com alarmes falsos em nenhum tipo de falha. Dos 6 testes com alarmes falsos, o parâmetros K_{qo} acusou falha em 5 deles. No outro teste com alarme falso, quem acusou falha foi o parâmetro Rh_3 . Os parâmetros estimados relacionados à equação do modelo matemático que se refere ao tanque TQ-03 (equação 4.24) são mais instáveis. Isto pode ser observado nos resultados dos testes apresentados neste capítulo. A explicação para isto pode estar no fato de que a vazão de saída de TQ-03 permanece praticamente constante durante vários longos intervalos de tempo (200 a 300 segundos), com pouca variação na amplitude (40% a 60% de $Q_{o_{max}}$), fazendo com que haja pouca dinâmica nos dados para estimar esta parte do modelo matemático. A vazão de entrada de TQ-02 é bastante variável ao longo da operação, tendo amplitudes entre 0% e 100% de $Q_{i_{max}}$ várias vezes para um mesmo set-point de nível. Uma solução para tentar melhorar a estimação dos parâmetros da equação 4.24 seria sobrepor um sinal pseudo-aleatório ao sinal de controle da válvula FCV-02, para tentar aumentar o conteúdo de informação dinâmica nos dados. Procedimentos desta espécie devem ser bem analisados pelos responsáveis pelo processo, pois neste caso ele poderá interferir diretamente no controle da vazão de saída de TQ-03.

Quanto ao algoritmo de isolação de falhas, não houve problema algum. O algoritmo foi capaz de isolar corretamente todas as falhas, ou grupos de falhas, implementadas.

7 *Conclusões*

Os métodos de DIF vêm ganhando mais atenção das indústrias nos últimos anos e estão começando a serem aplicados em plantas reais (Isermann, 1984, 1993; Frank, 1990; Frank & Seliger, 1991) e têm como principal vantagem proporcionar uma maior segurança tanto para o processo quanto para seus operadores. Um método de DIF ideal seria aquele que conseguisse detectar todas as falhas no processo, em tempo hábil, além de isolá-las corretamente. Na prática, o que se espera de um método de DIF é que ele seja capaz de detectar o maior número possível das falhas para as quais ele foi projetado. Além disso, isolar as falhas num tempo suficiente para que não haja danos nem ao processo nem aos operadores. Partindo-se deste princípio, foram feitas as considerações e as conclusões sobre o método de DIF aplicado ao STI, tendo como principal aspecto a sua confiabilidade. Os testes realizados na planta foram em número suficiente para que fossem obtidas as primeiras conclusões a respeito da confiabilidade do método de DIF. O tempo disponível não permitiu que mais testes fossem realizados. Cada teste realizado durou em média 1 hora e 30 minutos, entre os preparativos e o teste propriamente dito. Num processo industrial, seriam necessários mais testes para poder estimar o grau de confiabilidade do método de DIF. As falhas para as quais o método de DIF está preparado para atuar são as falhas descritas no capítulo 3 que são justamente falhas que podem ser facilmente implementadas sem causar danos à planta.

Este método de DIF mostrou ser muito sensível à instrumentação utilizada. No sistema de tanques interativos há uma particularidade muito interessante, que dificulta muito a estimação de parâmetros se não houver uma boa instrumentação para medir o valor dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03. O modelo matemático do STI descrito no capítulo 3 apresenta os termos $\sqrt{h_2 - h_3}$ nas equações 3.12.a e 3.12.b. Este termo significa a raiz quadrada da diferença (Δh) dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03. Esta diferença dos níveis, durante o funcionamento normal do processo, é algo em torno de no máximo 10% do valor máximo de nível dos tanques. Se, por exemplo, os medidores de nível dos dois tanques possuem uma margem de erro por volta de +/- 5% do fundo de escala, este erro poderá ser amplificado ou diminuído, quando se fizer a raiz quadrada da diferença dos níveis.

Seja por exemplo, o erro de leitura dos instrumento $e \cong 5\%$. Supondo que este erro e é somado ao valor real de nível do tanque TQ-02, e subtraído do valor real de nível do tanque TQ-03, poderemos ter:

- funcionamento normal sem erro de leitura dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03:

$$h_2 - h_3 = \Delta h \cong 10\% ;$$

$$\sqrt{h_2 - h_3} = \sqrt{\Delta h} \cong \sqrt{0,1} = 0,316 ;$$

- funcionamento com erro de leitura dos níveis dos tanques TQ-02 e TQ-03:

$$\text{medição do nível do tanque TQ-02} \Rightarrow H_2 = h_2 + e ;$$

$$\text{medição do nível do tanque TQ-03} \Rightarrow H_3 = h_3 - e ;$$

$$\sqrt{H_2 - H_3} = \sqrt{h_2 + e - (h_3 - e)} = \sqrt{\Delta h + 2e} ;$$

como $\Delta h \cong 10\%$ e $e \cong 5\%$:

$$\sqrt{H_2 - H_3} \cong \sqrt{0,2} = 0,447 ;$$

ou seja, nestas condições um erro de leitura de +/-5% pode refletir no modelo em 41% (0,447/0,316), quando se for fazer a estimação dos parâmetros.

Pode ocorrer um caso em que, mesmo com o processo em funcionamento normal, a diferença de nível Δh fique praticamente nula ou até mesmo negativa. Basta que o erro de leitura e seja subtraído do valor real do nível de TQ-02 e somado ao valor real do nível de TQ-03. Com isso:

medição do nível do tanque TQ-02 $\Rightarrow H_2 = h_2 - e$;

medição do nível do tanque TQ-03 $\Rightarrow H_3 = h_3 + e$;

$$\sqrt{H_2 - H_3} = \sqrt{h_2 - e - (h_3 + e)} = \sqrt{\Delta h - 2e} ;$$

como $\Delta h \cong 10\%$ e $e \cong 5\%$:

$$\sqrt{H_2 - H_3} \cong \sqrt{0,0} = 0 ;$$

Como pode-se observar, qualquer erro de leitura nas medições dos níveis de TQ-02 e TQ-03 pode ser extremamente perigoso para a estimação dos parâmetros. O sensor de nível LE-02 apresentou alguns problemas, tendo *offset* significativamente variável para variações de temperatura ambiente no LCPI (Camargo & Aguirre, 1997). O sensor de nível LE-01 também apresentou algumas variações de *offset* com a temperatura, embora com menores amplitudes. Se durante a realização de um teste, a temperatura ambiente do LCPI variar na ordem de $\pm 10^\circ\text{C}$, os parâmetros estimados irão divergir provocando um alarme indicando falha no processo. Outros problemas de instrumentação podem ser detectados pelos parâmetros, como por exemplo, a variação de tensão da rede elétrica. Esta variação é sentida sobre a velocidade das bombas BA-01 e BA-02 que determinam as vazões máximas de entrada em TQ-02 e de saída em TQ-03 e irá se refletir nos parâmetros estimados K_{qi} e K_{qo} e nos parâmetros auxiliares dq_i e dq_o . Este tipo de alteração não é prejudicial ao processo. Outra alteração, que também não é prejudicial ao processo e está sempre ocorrendo e interferindo nos parâmetros é a variação da curva característica das válvulas FCV-01 e FCV-02 (ver seção 5.2.3).

Um aspecto importante a se comentar é que não detectar falhas inerentes ao processo é tão difícil ou mais do que detectar as falhas para as quais o método foi projetado. Estas “falhas inerentes do processo” ocorrem de forma imprevisível e são difíceis de serem incluídas no modelo matemático para estimação de parâmetros. Como estas falhas fazem parte do processo e se são aceitas como perturbações normais pelos responsáveis do processo, o algoritmo de DIF tem a obrigação de ser robusto a tais perturbações. Classificar estas falhas como alarmes falsos é incorreto, pois na verdade o método de DIF está detectando uma falha, porém esta falha não era para ser detectada. Dos 41 testes realizados, 6 indicaram falha sem que houvesse nenhuma das falhas especificadas implementadas no processo. Nos testes simulados com o modelo matemático, não ocorreu nenhum alarme falso ou falha não identificada. Ou seja, para uma situação ideal, em que o modelo matemático utilizado para estimação dos parâmetros é exatamente o modelo matemático do processo, o algoritmo de DIF se comportará perfeitamente.

Sugestões para Trabalhos Futuros

A teoria dos métodos de detecção e isolamento de falhas, embora recente é muito ampla. Outros métodos de detecção e isolamento de falhas podem ser estudados, como também métodos de ação após a detecção e isolamento da falha. Assim, algumas propostas para a continuação deste trabalho são apresentadas:

- estudos sobre controle reconfigurável para permitir que o sistema possa continuar em funcionamento após a detecção de uma falha;
- estudo de um método de detecção e isolamento de falhas a partir da análise dos parâmetros estimados de um modelo discreto;
- desenvolvimento de outras técnicas para a definição dos limites de tolerância adaptativos, levando em conta mudanças de referência;
- desenvolver técnicas para analisar o desempenho de algoritmos de detecção e isolamento de falhas através do tempo de detecção da falha, taxa de alarmes falsos, número de falhas não detectadas, entre outros;
- aplicação do método de detecção e isolamento de falhas desenvolvido neste trabalho em outras plantas reais semelhantes.

Referências Bibliográficas

- Abreu, S. D. G.**, (1993). *Avaliação de Desempenho de Controladores Auto-ajustáveis*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Julho, 1993.
- Aguirre, L. A.**, (1994). *Computer-aided Analysis and Design of Control Systems Using Model Approximation Techniques*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 114, 273.
- Aguirre, L. A., Pereira, M. F. S. e Guimarães, R. A.**, (1996). *Instrument Fault Detection and Isolation in Tank System*. Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo.
- Braga, A. R.**, (1994). *Implementação de Estratégias de Controle Multimalha e Multivariável*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Dezembro, 1994.
- Camargo, H. A. e Aguirre, L. A.** (1996). *Detecção e Isolação de Falhas em Processos Automáticos Utilizando Estimacão de Parâmetros Físicos*. I Congresso Mineiro de Automação e IV Simpósio Regional de Instrumentação. Belo Horizonte.
- Camargo, H. A. e Aguirre, L. A.** (1997). *Implementação de um Medidor de Nível*. Relatório Interno do Laboratório de Controle de Processos Industriais da Universidade Federal de Minas Gerais.
- Caminhas, W., Pereira, M. F. S. e Aguirre, L. A.**, (1996). *Análise de Resultados de FDI Utilizando Métodos DOS e Neurofuzzy em uma Planta de Tanques Interativos*. Em preparação.

- Clark, R. N.**, (1978). *Instrument Fault Detection*. IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. AES-14, 456.
- Clark, R. N.** (1989). *State Estimation Schemes for Instrument Fault Detection*. Em: *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications* (R. J. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Eds.) Chap. 2, pp. 21. Prentice-Hall. London.
- Davies, R. B.** (1995). *Documentation for Newmat08A, A Matrix Library in C++*.
- DeLaat, J. C. e Merril, W. C.**, (1990). *A Real Time Microcomputer Implementation of Sensor Failure Detection for Turbofan Engines*. IEEE Control System Magazine, June.
- Emami-Naeini, A., Akhter, M. M. e Rock, S. M.**, (1988). *Effect of Model Uncertainty on Failure Detection - The Threshold Selector*. IEEE Transactions on Automatic Control, 33, 1106.
- Frank, P. M.**, (1990). *Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results*. Automatica, 26, 3, 459.
- Frank, P. M.**, (1994). *Enhancement of Robustness in Observer-Based Fault Detection*. Int. J. Control, 59, 4, 955.
- Frank, P. M. e Ding, X.**, (1993). *Frequency Domain Approach to Minimizing Detectable Faults in FDI Systems*. Appl. Math. and Comp. Sci. Vol. 3, 3, 417.
- Frank, P. M. e Ding, X.**, (1994). *Frequency Domain Approach to Optimally Robust Residual Generation and Evaluation for Model-based Fault Diagnosis*. Automatica. Vol. 30, 5, 789.
- Frank, P. M., Ding, X. e Seliger, B. K.** (1994). *A Frequency Domain Approach for Fault Detection at the Inverted Pendulum*. Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement. Vol. 4, 3, 387.
- Frank, P. M. e Koppen, O.**, (1993). *Review of Optimal Solutions to the Robustness Problem in Observer-Based Fault Detection*. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol 207, 105.
- Frank, P. M., Seliger, R.**, (1991). *Fault Detection and Isolation in Automatic Processes*. Control and Dynamic Systems, 49, 241.
- Frank, P. M., e Wünnenberg, J.**, (1989). *Robust Fault Diagnosis Using Unknown Input Observer Schemes*. Em: *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*. (R. J. Patton, P. M. Frank e R. N. Clark, Eds). Chap. 3, 47. Prentice-Hall. London.

- Gertler, J. J.**, (1988). *Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants*. IEEE Control Systems Magazine, december, 3.
- Gertler, J. e Singer, D.**, (1990). *A New Structural Framework for Parity Equation-based Failure Detection and Isolation*. Automatica, 26, 2, 381.
- Hassan, M. F., Sultan, M. A. e Attia, M. S.** (1992). *Fault Detection in Large-scale Stochastic Dynamic Systems*. IEE Proceedings-D. Vol. 139, 2.
- Ho, Y. C.** (1962). *On the Stochastic Approximation Method and Optimal Filtering Theory*. J. Math. Anal. App., 6, 152.
- Howell, J.**, (1994). *Model-based Fault Detection in Information Poor Plants*. Automatica, 30, 6, 929.
- Isermann, R.** (1984). *Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A Survey*. Automatica, 20, 387.
- Isermann, R.** (1992). *Estimation of Physical Parameters for Dynamic Processes with Application to an Industrial Robot*. Int. J. Control, 55, 1287.
- Isermann, R.** (1993). *Fault Diagnosis of Machines via Parameter Estimation and Knowledge Processing - Tutorial Paper*. Automatica, 29, 815.
- Johnson, L. W. e Riess, R. D.** (1982). *Numerical Analysis*. (Reading, MA: Addison-Wesley).
- Jota, F. G., Braga, A. R. e Pena, R. T.** (1995). *Performance Assessment of Advanced Process Control Algorithms Using an Interacting Tank System*. IEEE Industry Applications Society, 30th Annual Meeting, Orlando, Florida, October 8-12.
- Korbicz, J., Fathi, Z. e Ramirez, W. F.** (1993). *State Estimation Schemes for Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Systems*. Int. J. Systems Sci., 24, 985.
- Koscielny, J. M.**, (1995). *Fault Isolation in Industrial Processes by the Dynamic Table of States Method*. Automatica, 31, 5, 747.
- Kraus, T. P., Shure, L. e Little, J. N.** (1994). *Signal Processing Toolbox User's Guide - for use with MATLAB™*. By The MathWorks, Inc.
- Leonard, J. A. e Kramer, M.**, (1991). *Radial Basis Function Networks for Classifying Process Faults*. IEEE Control Systems. April, pp. 31.
- Marquez, H. J. e Diduch, C. P.**, (1992). *Sensitivity of Failure Detection Using Generalized Observers*. Automatica, 28, 4, 837.
- MathWorks, Inc.** (1990). *PC-MATLAB™ for MS-DOS Personal Computers Software User's Guide*.

- Medvedev, A.**, (1996). *Continuous Least-Squares Observers with Applications*. IEEE Transactions on Automatic Control, 41, 10, october.
- Millman, J. e Halkias, C.C.** (1981). *Eletrônica, Dispositivos e Circuitos*. McGraw-Hill do Brasil, 877.
- Naidu, S. R., Zafiriou, E. e McAvoy, T.**, (1990). *Use of Neural Networks for Sensor Failure Detection in a Control System*. IEEE Control Systems Magazine. April, pp. 49.
- Narendra, K. S. e Balakrishnan, J.** (1994). *Adaptive Control Using Switching and Tuning*. Proceedings of the Eighth Yale Workshop on Adaptive And Learning Systems, June 13-15.
- Narendra, K. S., Balakrishnan, J. e Ciliz, M. K.**, (1995). *Adaptation and Learning Using Multiple Models, Switching, and Tuning*. IEEE Control Systems Magazine, June.
- Nikiforov, I., Varavva, V. e Kireichikov, V.**, (1993). *Application of Statistical Fault Detection Algorithms to Navigation Systems Monitoring*. Automatica, 29, 5, 1275.
- Norton, J. P.**, (1986). *An Introduction to Identification*. Academic Press Limited, London.
- Papoulis, A.**, (1984). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill International Editions, New York.
- Park, J., Rizzoni, G. e Ribbens, W. B.**, (1994). *On the Representation of Sensor Faults in Fault Detection Filters*. Automatica, 30, 11, 1793.
- Patton, R.**, (1993). *Fault Detection and Diagnosis in Aerospace Systems Using Analytical Redundancy*. Seminar on: Intelligent Sensors. London.
- Patton, R. J. e Chen, J.**, (1993). *Optimal Unknown Input Distribution Matrix Selection in Robust Fault Diagnosis*. Automatica, 29, 4, 837.
- Patton, R., Frank, P., e Clark, R.**, (1989). *Fault Diagnosis in Dynamic Systems. Theory and Applications*. New York: Prentice Hall.
- Patton, R. J. e Kangethe, S. M.** (1989). *Robust Fault Diagnosis Using Eigenstructure Assignment of Observers*. Em: Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications. (R. J. Patton, P. M. Frank e R. N. Clark, Eds.). Chap. 4, 99. Prentice-Hall. London.
- Pena, R. T.**, (1983). *Development of a Boiler-turbine Mathematical Model for Power Plant Operation Studies*. The University of Texas at Austin, U.S.A., Phd Dissertation, EE. Dept.

- Pereira, M. F. S., Aguirre, L. A., Pena, R. T.** (1996). *Modelagem de Falhas num Sistema de Tanques Interativos*. Em preparação.
- Pereira, M. F. S.**, (1996). *Desenvolvimento e Aplicação de um Método de Detecção e Identificação de Falhas Baseado em Observadores Dedicados*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Julho, 1996.
- Philips, C. L. e Nagle, H. T.** (1995). *Digital Control System Analysis and Design*. 3rd Ed., Prentice-Hall Int., Inc, New Jersey.
- Polito, C. M.**, (1995). *Utilização de Critérios de Avaliação de Desempenho Global para Sintonia de Controladores de Processos Multimalha*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Rauch, H. E.**, (1994). *Intelligent Fault Diagnosis and Control Reconfiguration*. IEE Control Systems, Jun. 1994, 6.
- Rauch, H. E.**, (1995). *Autonomous Control Reconfiguration*. IEEE Control Systems, Dec. 1995, 37.
- Ray, A. e Luck, R.**, (1991). *An Introduction to Sensor Signal Validation in Redundant Measurement Systems*. IEEE Control Systems. Feb., pp. 44.
- Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K. e Tneketzis, D.**, (1995). *Diagnosability of Discrete-Event Systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, 40, 9, september.
- Seborg, D. E., Edgard, T. F. e Mellichamp, D. A.**, (1989). *Process Dynamics and Control*. Wiley, New York.
- Shinskey, F. G.**, (1988). *Process Control Systems, Application, Design, and Tuning*. Third Edition. McGraw-Hill International Editions.
- Sorsa, T. e Koivo, H. N.**, (1993). *Application of Artificial Neural Networks in Process Fault Diagnosis*. Automatica, 29, 4, 843.
- Stengel, R. F.**, (1991). *Intelligent Failure-Tolerant Control*. IEEE Control Systems. June, 11, 14.
- Tsang, K. M. e Billings, S. A.** (1993). *Identification of Systems from Non-Uniformly Sampled Data*. Submitted for publication.
- Tsang, K. M. e Billings, S. A.** (1994). *Identification of Continuous Time Nonlinear Systems Using Delayed State Variable Filters*. Int. J. Control, 60, 159.

- Tzafestas, S. G.**, (1989). *System Fault Diagnosis Using the Knowledge-Based Methodology*. Em: *Fault in Dynamic Systems. Theory and Applications*. Chap. 15, 507. New York. Prentice Hall.
- Young, P. C.** (1981). *Parameter Estimation for Continuous-Time Models - A Survey*. *Automatica*, 17, 23.
- Watanabe, K.**, (1989). *A Multiple Model Adaptive Filtering Approach to Fault Diagnosis in Stochastic Systems*. Em: *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*. (R. J. Patton, P. M. Frank e R. N. Clark, Eds). Chap. 12, 411. Prentice-Hall. London, 1989.
- Willsky, A.**, (1976). *A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems*. *Automatica*, 12, 601.
- Zhang, Q., Basseville, M. e Benveniste, A.**, (1994). *Early Warning of Slight Changes in Systems*. *Automatica*, 30, 1, 95.
- Zolghadri, A., Bergeon, B. e Monsion, M.**, (1993). *A Two-ellipsoid Overlap Test for On-line Failure Detection*. *Automatica*, 29, 6, 1517.

Apêndice A

Sistema de Tanques Interativos

A.1 - Estrutura do Hardware

O Sistema de Tanques Interativos (STI) encontra-se descrito em (Abreu, 1993 e Braga, 1994), ambos alunos de mestrado do Professor Fábio Gonçalves Jota, verdadeiro idealizador e construtor do sistema. A estrutura do *hardware* do STI é composta por:

- *Microcomputador PC 386* - executa o software de supervisão e controle;
- *Controlador Lógico Programável (CLP AL1000/I28 - Altus)* - realiza a comunicação de dados entre o microcomputador e a planta. É responsável pelo controle lógico do processo, fazendo o intertravamento de funções e condições de operação do processo quando necessário para o funcionamento correto do sistema. A comunicação entre o CLP e o microcomputador é feita através da porta serial RS-232C. Informações detalhadas sobre o funcionamento do *driver* de comunicação entre o microcomputador e o CLP podem ser obtidas em (Pereira, 1996);
- *Painel de Operação* - permite a seleção do modo de operação da planta podendo ser automático ou manual (ver figura A.1). No modo de operação automático, o microcomputador é que comanda a planta. No modo de operação manual, cada equipamento pode ser comandado individualmente

através do painel de operação. Para se realizar o comando manual é preciso que a chave de seleção esteja na posição LOCAL. Detalhes sobre o funcionamento do painel de operação podem ser obtidos em (Braga, 1994).

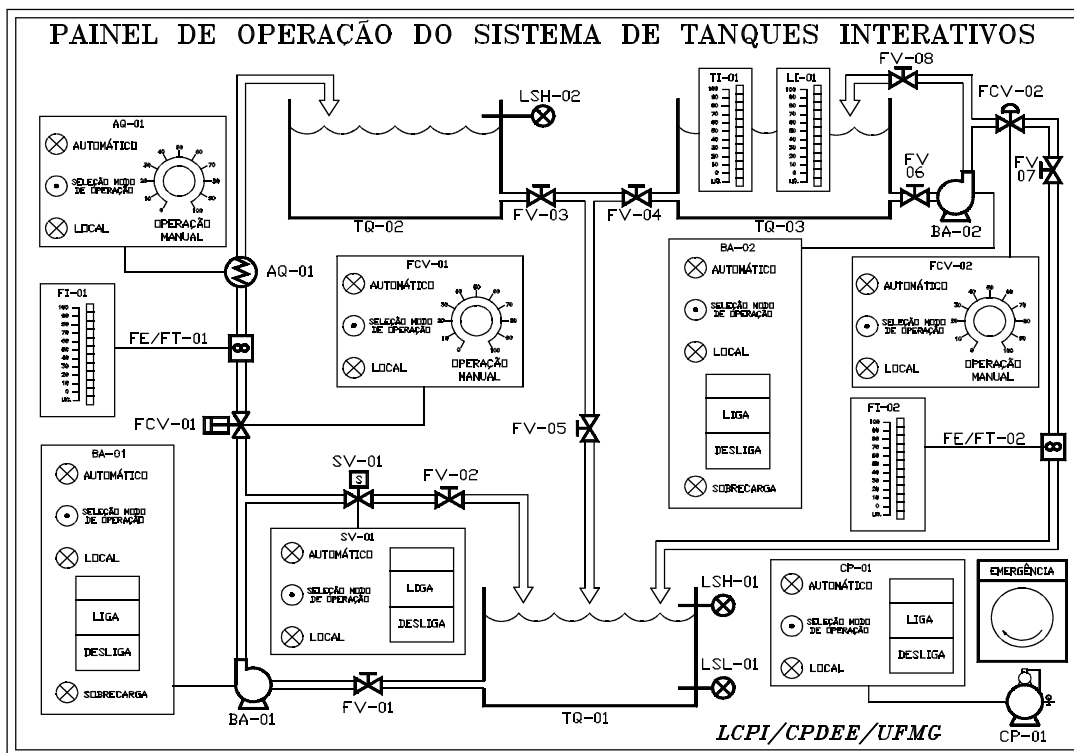


Figura-A.1 - Layout do painel de operação do STI (Braga, 1994).

A transmissão do sinal analógico é feita em corrente, numa faixa de 4 a 20 mA, onde uma entrada nula produz 4 mA e uma entrada com valor de fundo de escala produz 20 mA. A transmissão de corrente foi utilizada porque torna o sinal mais imune a tensões induzidas (Braga, 1994). A figura A.2 mostra o diagrama de blocos do STI.

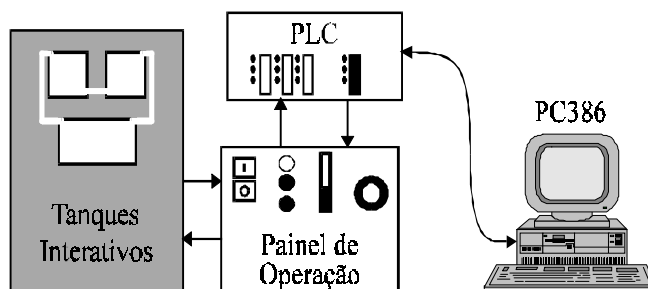


Figura-A.2 - Fluxo de informações entre o hardware e a planta do STI (Pereira, 1996).

A.2 - Componentes da planta do STI

A planta possui três tanques (figura A.3), com suas dimensões mostradas na tabela A.1. Há um acoplamento entre os tanques TQ-02 e TQ-03, motivo pelo qual é dado o nome de Tanques Interativos. A intensidade deste acoplamento pode ser modificada através das válvulas manuais FV-03 e FV-04 que provocam alterações significativas na resistência hidráulica de acoplamento. Durante o funcionamento normal da planta, a válvula FV-05 fica totalmente fechada. As bombas centrífugas BA-01 e BA-02 são responsáveis pela circulação da água. As variáveis medidas no processo são os níveis de TQ-02 e TQ-03, a vazão de entrada de TQ-02 e a vazão de saída de TQ-03, e as variáveis controladas são o nível de TQ-03 e a vazão de saída de TQ-03.

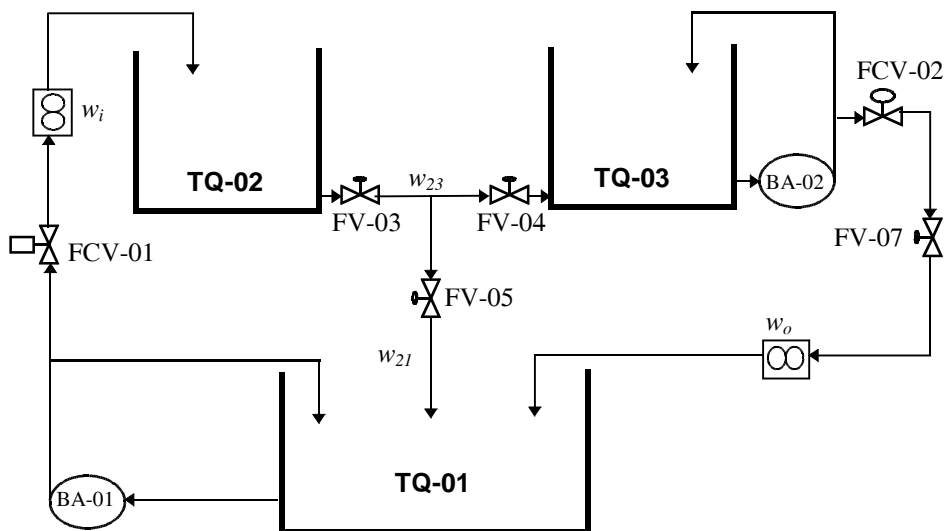


Figura-A.3 - Diagrama de fluxo de massa do STI (Braga, 1994).

Tabela-A.1 - Dimensões físicas dos tanques

Tanque	Área Transversal (m ²)	Altura (m)	Capacidade (l)
TQ-01	0,875	0,800	700
TQ-02	0,433	0,700	300
TQ-03	0,433	0,700	300

A.3 - Instrumentação

A.3.1 - Medidor de Nível (LE/LT-01)

O sensor LE/LT-01 mede o nível do tanque TQ-03. O transdutor de pressão utilizado para medir o nível (PX 240-Omega) é constituído de uma célula de carga que contém uma ponte de *strain-gages*. Um tubo é introduzido no interior do tanque possibilitando realizar a medida da altura da coluna d'água que comprime o ar dentro do tubo. A pressão do ar dentro do tubo introduzido no tanque é proporcional ao nível. Este medidor apresenta boas características de linearidade (Braga, 1994).

A.3.2 - Medidor de Nível (LE/LT-02)

O sensor LE/LT-02 mede o nível do tanque TQ-02. Foi utilizado um transdutor de pressão do tipo piezo-resistivo (PX 185-030D5V - Omega). O princípio de funcionamento deste medidor de nível é o mesmo do medidor LE/LT-01, descrito no item A.3.1 (Camargo & Aguirre, 1997).

A.3.3 - Medidores de Vazão (FE/FT-01 e FE/FT-02)

Os medidores de vazão utilizados na planta são do tipo turbina. Estes instrumentos têm como características: baixas perdas por atrito e uma relação bem linear entre a velocidade da turbina e a vazão (Braga, 1994). Eles funcionam do seguinte modo: um feixe de luz infravermelho é interceptado pelas aletas da turbina gerando uma série de pulsos. A frequência destes pulsos é proporcional à vazão. A dinâmica deste tipo de medidor é bastante rápida e por isso não será considerada neste trabalho.

A.3.4 - Válvulas Pneumáticas (FCV-01 e FCV-02)

As válvulas de controle utilizadas na planta são do tipo igual porcentagem. A válvula FCV-01 possui atuador do tipo pistão e opera com a característica A-A (ar para abrir), ou seja, normalmente fechada. O atuador da válvula FCV-02 é do tipo diafragma e ela opera com característica A-F (ar para fechar), sendo normalmente aberta. A escolha destas características é baseada em questões de segurança. Em caso de falha no transmissor de FCV-01, esta válvula deve permanecer fechada para evitar transbordamento nos tanques TQ-02 e TQ-03. A válvula FCV-02 deve permanecer aberta para permitir o escoamento de água de TQ-03 para TQ-01 (Braga, 1994).

As curvas características de cada válvula foram obtidas conforme o procedimento adotado por (Pereira, 1996). Procurou-se um ajuste de curva que representasse bem a curva característica de cada válvula. Utilizou-se para isto um polinômio de ordem 5, relacionando a indicação normalizada do medidor de vazão em função do seu respectivo sinal de controle, também normalizado. A ordem do polinômio foi escolhida empiricamente, levando-se em consideração uma boa aproximação com um polinômio de menor grau possível. As figuras A.4.a e A.4.b mostram, como exemplo, as curvas características das válvulas FCV-01 e FCV-02, respectivamente, obtidas em 18/11/96, para a realização de uma seção de testes. Os polinômios de ajuste das curvas características das válvulas FCV-01 e FCV-02 são mostrados nas equações A.1 e A.2, respectivamente. Os termos u_1 e u_2 são os sinais de controle que atuam nas respectivas válvulas, variando seus valores entre 0 e 1, sendo $u_1=0$ correspondente à válvula FCV-01 totalmente fechada e o valor $u_1=1$, à válvula FCV-01 totalmente aberta; e $u_2=0$ correspondente à válvula FCV-02 totalmente aberta e o valor $u_2=1$, à válvula FCV-02 totalmente fechada. As vazões máximas de entrada do tanque TQ-02 ($Q_{i_{max}}$) e de saída do tanque TQ-03 ($Q_{o_{max}}$) são, respectivamente:

$$Q_{i_{max}} = 1,30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{o_{max}} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_i(u_1) = Q_{i_{max}}(-7,2121 \cdot u_1^5 + 13,3752 \cdot u_1^4 - 6,7465 \cdot u_1^3 + 1,1579 \cdot u_1^2 + 0,3899 \cdot u_1 - 0,0102) \quad (A.1)$$

$$q_o(u_2) = Q_{o_{max}}(-1,4677 \cdot u_2^5 - 4,6220 \cdot u_2^4 + 12,2272 \cdot u_2^3 - 7,3656 \cdot u_2^2 + 0,1674 \cdot u_2 + 0,9813) \quad (A.2)$$

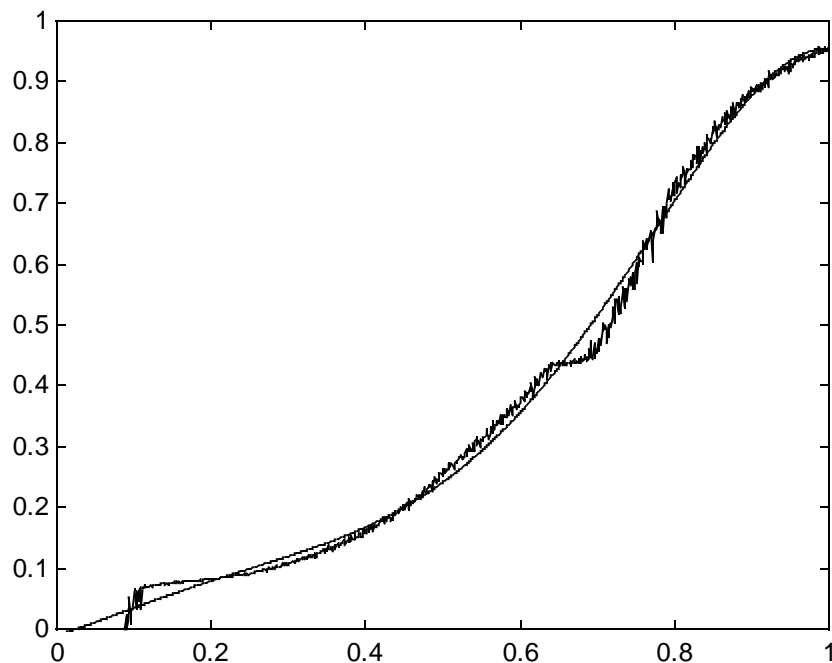


Figura-A.4.a - Curva característica da válvula FCV-01 com seu respectivo polinômio de ajuste.

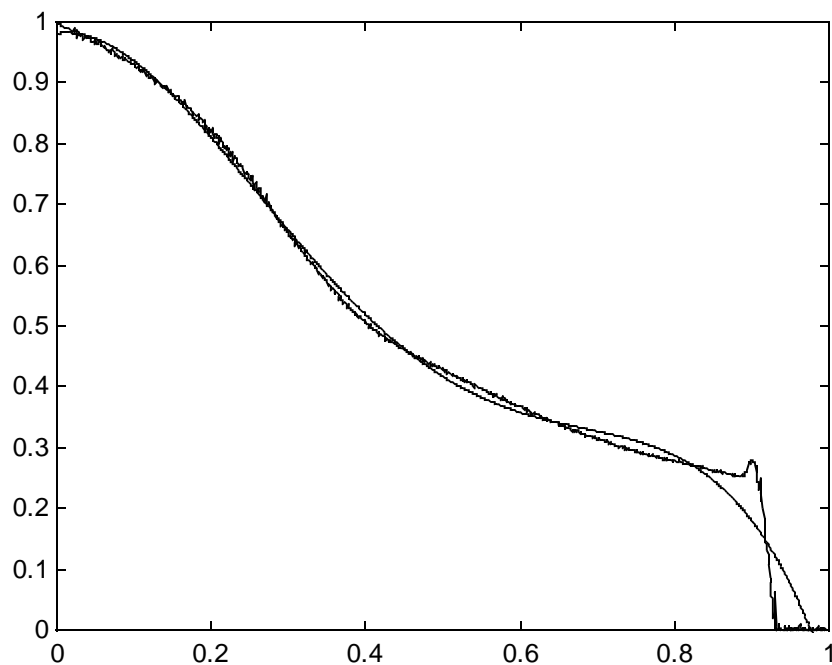


Figura-A.4.b - Curva característica da válvula FCV-02 com seu respectivo polinômio de ajuste.

Apêndice B

Algoritmo de Detecção e Isolação de Falhas

B.1 - Estrutura Principal do Algoritmo de DIF

- Inicialização do algoritmo;

loop (enquanto durar a monitoração)

- Atuação nas válvulas / Leitura das variáveis;
- Filtragem dos sinais;
- Estimação de parâmetros;
- Definição dos limites de tolerância;
- Verificação de ocorrência de falha

se há falha

- alarme;
- *Reset* das matrizes de covariância;
- Isolação da falha;

fim se

fim loop

B.2 - Inicialização do Algoritmo

A inicialização do algoritmo se refere às inicializações dos vetores de parâmetros θ_2 e θ_3 (seção 5.3.2), e das matrizes de covariância P_2 e P_3 (seção 5.3.3).

B.3 - Atuação nas Válvulas / Leitura das Variáveis

A transmissão de sinais entre o CLP e a planta, seja para as válvulas atuadoras ou para os medidores, é feita no padrão de 4 a 20 mA (ver Apêndice A). O CLP converte estes sinais para valores normalizados, entre 0 e 1, e os envia para o computador. O algoritmo, por sua vez, converte estes valores para grandezas de engenharia, as quais são utilizadas tanto para cálculos do controlador quanto para a estimação de parâmetros. A atuação nas válvulas e a leitura das variáveis ocorrem praticamente no mesmo instante.

B.4 - Filtragem dos sinais

Os sinais utilizados para a estimação de parâmetros (u_1 , u_2 , h_2 e h_3) são filtrados pelo Filtro de Variáveis de Estado (ver seção 4.4.2).

B.5 - Estimação de parâmetros

Os parâmetros são estimados conforme os procedimentos apresentados nas seções 4.4.3, 4.4.4 e 4.4.5. Nos primeiros 1500 segundos, as matrizes de covariância P_2 e P_3 são calculadas normalmente (ver seção 4.2). Após este intervalo de tempo, os elementos destas matrizes são mantidos fixos, com os valores que possuíam no instante de tempo igual a 1500 segundos (ver seção 5.3.4). Os parâmetros auxiliares são calculados conforme seção 5.3.6.

B.6 - Definição dos Limites de Tolerância

A partir do instante de tempo igual a 1.000 segundos, começam a ser calculados os limites de tolerância para a variação dos parâmetros. Em primeiro lugar, calcula-se os pontos de referência para todos os parâmetros monitorados (ver seção 5.4.2). Em

seguida, são determinadas as larguras das faixas de tolerância dos parâmetros monitorados. As larguras das faixas de tolerância devem estar entre os valores máximos e mínimos (ver seção 5.4.3 e 5.4.5).

B.7 - Verificação de Ocorrência de Falha

Após ser inicializada a operação da planta, são esperados 1.000 segundos para que possa haver a verificação da ocorrência de falha (ver seção 5.3.7). Este procedimento consiste em verificar se o parâmetro estimado se encontra dentro de sua respectiva faixa de tolerância. A indicação de falha só ocorrerá após 5 iterações seguidas em que o valor de algum dos parâmetros se encontrar fora de sua faixa de tolerância (ver seção 5.4.6) ou fora de sua faixa de segurança (ver seção 5.4.4).

B.8 - Alarme

Sendo detectada alguma falha, o algoritmo irá avisar ao operador do processo sobre a ocorrência desta falha.

B.9 - Reset das Matrizes de Covariância

Quando o algoritmo detecta uma falha, ocorre o *reset* das matrizes de covariância (ver seção 5.3.5).

B.10 - Isolação da Falha

A análise para a isolação da falha é inicializada imediatamente a sua detecção, mas o resultado final é fornecido pelo algoritmo 120 segundos depois. A técnica de isolação de falhas é apresentada na seção 6.3. Após realizada a isolação de falhas, o algoritmo fornece uma informação ao operador do processo sobre a localização desta falha.