

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Monitoramento da Condição Operacional de Válvulas Servoproporcionais em Tempo Real

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

João Marcelo Romano

Florianópolis, fevereiro de 2014

Monitoramento da Condição Operacional de Válvulas Servoproporcionais em Tempo Real

João Marcelo Romano

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

Assinatura do Orientador

Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Aos colegas de trabalho Yesid e Pedro pela troca de ideias e conhecimento, ao Desyel por supervisionar meu trabalho, dedicar tempo a me ensinar sobre hidráulica, orientar e acreditar na minha capacidade. Ao Prof. Victor pela paciência e orientação, em especial, à escrita deste documento. Ao CNPq pelo apoio financeiro, e à *Reivax* e ao *Laship* por proporcionarem todo suporte necessário para que as atividades deste projeto fossem realizadas.

Resumo

Este trabalho trata das atividades desenvolvidas em um projeto de pesquisa realizado junto ao departamento de pesquisa e desenvolvimento da empresa *Reivax S/A Automação e Controle*. O projeto trata do desenvolvimento de uma funcionalidade para monitoramento da condição operacional visando à detecção precoce de falhas em válvulas proporcionais eletricamente moduladas, componentes do sistema eletro-hidráulico de posição de reguladores de velocidade produzidos pela empresa. O trabalho apresenta as técnicas que vinham sendo utilizadas para desenvolver o sistema de monitoramento juntamente com a demonstração de um método para detecção de falhas alternativo, elaborado e adicionado ao sistema com o propósito de aumentar sua robustez. Tal método é capaz de monitorar a atual condição da válvula, indicando falhas nos sinais de posição do carretel, por meio da detecção de mudanças estatísticas nas propriedades desses sinais. Para elaboração e validação deste projeto, ensaios foram realizados junto à bancada do Laboratório de Hidráulica do *LASHIP*, avaliando-se a sensibilidade do sistema como um todo frente a falhas por contaminação e travamento do carretel. Os resultados obtidos com as técnicas utilizadas são apresentados, comparados e a eficácia do sistema de monitoramento implementado discutida, juntamente com as perspectivas de implantação da funcionalidade e sua extensão para outros componentes.

Palavras-chave: Monitoramento de Condição, Detecção de Falhas, Válvula Proporcional.

Abstract

This work aims at contributing to a research project that has been carried out at the Research and Development department of *Reivax S/A Control and Automation*. The project regards the development of a condition monitoring functionality for the early detection of faults on electrically modulated proportional valves located inside the electro-hydraulic positional system of speed regulators produced by the company. The document presents techniques that were already being used to build a monitoring system, based on valve's spool position signals, and the development of an alternative method to be added to the system, capable to detect abrupt changes on statistical properties of these signals. To characterize and evaluate this design, experiments on a test bench from the Laboratory of Hydraulics in *LASHIP* were performed to analyze the system sensitivity under spool contamination and spool sticking. The results obtained from both methods are presented and compared and the condition monitoring system usefulness is discussed, as well with its prospects of implementation and extension to other components.

Keywords: Condition Monitoring, Fault Detection, Proportional Valve.

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo.....	4
Abstract.....	5
Sumário.....	6
Simbologia.....	9
Capítulo 1: Introdução	11
1.1: Justificativas e motivações.....	12
1.2: Objetivos e metodologia.....	13
1.3: Contribuições	15
1.4: Organização do documento	15
Capítulo 2: A empresa no contexto do projeto	17
2.1: Informações da empresa	17
2.2: Regulação de velocidade e motivação para o projeto.....	18
2.3: Relevância do trabalho no contexto empresarial	20
Capítulo 3: Sistemas de monitoramento e detecção de falhas.....	22
3.1: Supervisão e monitoramento de processos	22
3.2: Conceitos sobre falhas.....	23
3.2.1: Faltas, falhas e mau funcionamento.....	23
3.2.2: Classificação de falhas.....	24
3.3: Características de sistemas de monitoramento <i>on-line</i>	25
3.4: Métodos de detecção de falhas <i>on-line</i>	26
Capítulo 4: Válvulas proporcionais eletricamente moduladas	29
4.1: Circuitos hidráulicos e válvulas proporcionais.....	29

4.2: Aspectos construtivos de válvulas proporcionais	30
4.2.1: Acionamento por solenóide proporcional	30
4.2.2: Carretel e geometria da válvula	32
4.3: Forças que atuam em uma válvula carretel	34
4.4: Variação da vazão nos orifícios da válvula	37
4.5: Eletrônica embarcada	38
Capítulo 5: Metodologia para implementação do sistema de monitoramento de condição	40
5.1: Caracterização experimental da válvula	40
5.2: Geração da Informação de Condição	42
5.3: Abordagens para detecção de falhas.....	44
5.3.1: Verificação de limites	44
5.3.2: Detecção de mudanças abruptas.....	47
5.4: Visão geral do sistema de monitoramento	53
Capítulo 6: Caracterização experimental do sistema de monitoramento de condição em laboratório	55
6.1: Bancada de ensaios.....	55
6.1.1: Circuito hidráulico.....	55
6.1.2: Aquisição de dados.....	57
6.1.3: Válvula direcional proporcional ATOS.....	60
6.2: Ensaios de caracterização experimental da válvula.....	64
6.2.1: Sinal de comando versus posição do carretel (U_c x x_v) a uma queda de pressão Δp na válvula	64
6.2.2: Sinal de comando versus posição do carretel (U_c x x_v) variando a frequência do sinal de comando U_c	67

6.2.3: Sinal de comando versus posição do carretel para diferentes faixas de temperatura.....	68
6.3: Parametrização do sistema de monitoramento	69
6.3.1: Geração das funções-modelo lineares.....	69
6.3.2: Obtenção das funções de limite dinâmico.....	70
6.3.3: Parametrização do algoritmo de detecção	72
6.3.4: Diagrama de blocos em simulink.....	74
Capítulo 7: Ensaio de validação e resultados.....	76
7.1: Ensaio com travamento do carretel.....	77
7.1.1: Ensaio de travamento com referência senoidal	78
7.1.2 Ensaio de travamento com referência do tipo degrau	82
7.2: Ensaio com a válvula contaminada	85
7.2.1: Ensaio de contaminação com referência senoidal	86
7.2.2: Ensaio de contaminação com referência do tipo degrau....	90
Capítulo 8: Conclusões e perspectivas futuras	95
8.1: Avaliação do sistema de monitoramento	95
8.1.1: Resultados dos métodos de detecção	95
8.1.2: Uso de ensaios de experimentação para caracterização do sistema.....	95
8.1.3: Tolerância a erros nas funções-limite dinâmicas	96
8.1.4: Parametrização do algoritmo de detecção	97
8.1.5: Efeito de incertezas de sensoriamento e perturbações.....	97
8.1.6: Acoplamento de um sistema de diagnóstico	98
8.2: Sugestões para trabalhos futuros	99
Referências Bibliográficas:	100

Simbologia

Símbolo	Descrição
q_v	Vazão de controle
K_v	Coeficiente de vazão
A_0	Área do orifício
cd	Coeficiente de descarga
Δp	Diferença de pressão
ρ	Massa específica do fluido
fr	Folga radial
lr	Comprimento do ressalto
lp	Comprimento do pórtico
F_{at}	Força de atrito
p	Pressão
B_e	Coeficiente de atrito viscoso efetivo
U_c	Sinal de comando/controle
x_{vlim}	Posição do carretel da função limite
x_{vlin}	Posição do carretel da função-modelo linear
a_s	Coeficiente angular da função-modelo de subida
b_s	Coeficiente linear da função-modelo de subida
a_d	Coeficiente angular da função-modelo de descida
b_d	Coeficiente linear da função-modelo de descida
a_{lim_s}	Coeficiente angular da função limite de subida
b_{lim_s}	Coeficiente linear da função limite de subida

a_{lim_d}	Coeficiente angular da função limite de descida
b_{lim_d}	Coeficiente linear da função limite de descida
e_{tol}	Limiar de posicionamento do carretel
Δe	Valor de tolerância admitido para erro de posição
x_{vtol}	Limiar de posição do carretel
$d_{máx}$	Distância máxima absoluta
S_i	Função soma acumulada
s_i	Função de <i>log-verossimilhança</i>
r_i	Resíduo
$p(A B)$	Probabilidade de ocorrer A dado B
μ	Média
σ	Desvio padrão
α	Probabilidade de ocorrência de falso alarme
β	Probabilidade de ocorrência de alarme perdido
v	Magnitude de mudança na média

Capítulo 1: Introdução

A demanda sempre crescente por eficiência, qualidade dos produtos, redução de custos e a integração dos vários sistemas de controle no setor industrial, aliada aos preços elevados envolvidos em seus processos e à inquestionável necessidade de segurança, justificam a importância da supervisão (ou monitoração) e dos sistemas de detecção e diagnóstico de falhas envolvendo tais processos [10]. A maneira clássica de supervisionar um processo, ou seja, checar se determinadas variáveis ultrapassaram seus respectivos limites, pode ser substituída por sistemas mais elaborados baseados em várias técnicas modernas provenientes das engenharias e da informática inteligente, por exemplo, com o intuito de manter sempre os sistemas em funcionamento com todos os seus parâmetros sob controle.

Sistemas de detecção de falhas baseados em modelos consistem em desenvolver algoritmos assentados em alguma compreensão fundamental do processo físico, como relações matemáticas funcionais entre as entradas e as saídas, ou descrições comportamentais do sistema [4]. As saídas destes modelos (comportamento esperado) são comparadas às saídas do sistema (comportamento real) para identificar falhas. Em geral, esses algoritmos utilizam-se de observadores ou filtros de Kalman embutindo um modelo teórico linear (ou não linear) aproximado do sistema real os quais, a partir de sinais de entrada e saída, são capazes de estimar sinais esperados do comportamento normal do sistema. Estes sinais são comparados aos obtidos do processo físico e o desvio observado monitorado. Há de se dizer, portanto, que esses sistemas de detecção são intrinsecamente dependentes da confiabilidade do modelo teórico em representar o sistema real. Outras dificuldades desta abordagem estão relacionadas ao ruído de medição e processo que podem causar incertezas aos modelos [10].

Este trabalho propõe uma arquitetura para sistemas de detecção de falhas similar a este descrito acima, mas utilizando-se curvas experimentais (entrada-saída) do processo (válvula), objetivando minimizar as incertezas

relacionadas aos modelos teóricos. Os desvios de comportamento observados são avaliados, também experimentalmente, segundo duas abordagens de detecção de falhas, parametrizadas frente a ensaios e testes para aumentar a confiabilidade do sistema em questão frente a falsas detecções e a alarmes perdidos.

1.1: Justificativas e motivações

Toda a tecnologia envolvida nos processos industriais, nas linhas de montagem, de produção e até mesmo nos outros setores das indústrias atuais resulta em um ambiente cada vez mais preciso, eficiente, confiável e seguro quando comparados aos mesmos encontrados no passado. O uso de tecnologias oferecidas pelo avanço da eletrônica digital e da informática torna possível o monitoramento de produtos desde a sua fase inicial de produção, no chão de fábrica, até o seu contato com o mercado, possibilitando um maior controle de tudo o que acontece no processo de fabricação de bens industrializáveis dos mais diferentes setores.

Mesmo com esse aparato tecnológico, motivos para continuar aumentando o grau de automação na supervisão dos processos ainda sobram. Além da concorrência cada vez mais acirrada em diversos setores da indústria, existem ainda as leis ambientais altamente rigorosas que preveem multas para danos à natureza, além do desperdício de produtos e de possíveis danos causados a equipamentos. Todos esses motivos, quando sintetizados, aliados ao desperdício de energia com pessoal e material indicam perdas financeiras indesejáveis para qualquer indústria.

Além do aumento do controle e da supervisão, a tecnologia envolvida cria uma infraestrutura que disponibiliza informações detalhadas sobre os processos. Tais informações podem ser utilizadas em sistemas auxiliares que têm o intuito de detectar possíveis anomalias em alguma fase desses processos.

Aliado a esta ideia e com a alta demanda de tempo e dinheiro investidos em manutenção escalonada, a Reivax resolveu investir em pesquisa na área de manutenção preditiva tentando, a partir do monitoramento e detecção dos desvios de funcionamento dos produtos, levantar os locais físicos e as justificativas do processo ter apresentado determinado problema.

O último parágrafo apresenta as duas etapas que, em geral, um sistema de detecção e isolamento de falhas (*FDI – Fault Detection and Isolation*) deve implementar. A primeira delas é a detecção de uma falta, ou seja, a percepção de que algo está errado e pode estar levando o processo a algum desvio mais significativo do seu funcionamento normal. Neste ponto ainda não se sabe a localização ou o motivo que ocasionou esta falta, e se conclui que existe alguma anormalidade através da comparação entre valores provenientes da planta física e valores conhecidos do modelo saudável do processo.

A segunda etapa corresponde ao isolamento da falta, ou seja, a identificação do componente ou local físico dentro do sistema onde se encontra o problema detectado no passo anterior, além da determinação do tipo de anomalia e sua duração de ocorrência. Geralmente, para a fase de identificação, os sistemas *FDI* fazem uso de um classificador de faltas. Este, por sua vez, analisa os sinais provenientes da etapa anterior para tentar chegar a alguma conclusão, ou diagnóstico.

Este trabalho compreende as atividades da primeira etapa - a detecção, procurando identificar comportamentos atípicos em uma válvula proporcional que possam servir de alerta ao respectivo usuário, operador do sistema, de que alguma anormalidade está acontecendo neste equipamento. Trabalhos com o mesmo objetivo na área de hidráulica podem ser encontrados em [10] e [7].

1.2: Objetivos e metodologia

Tem-se por objetivo propor, comparar e analisar o desempenho de um método de detecção de falhas juntando experimentação e técnicas de detecção

de desvios de operação para o monitoramento de condição de uma válvula proporcional eletricamente modulada, cujo modelo é usado pela *Reivax* em seus reguladores de velocidade. Para cumprir com estes objetivos a metodologia proposta pelo projeto consiste em caracterizar experimentalmente o funcionamento correto da válvula aplicando sinais de entrada de modo a obter uma resposta de sinal da posição do carretel para toda região de operação da válvula, avaliando-o sob diferentes variáveis, como diferença de pressão, temperatura do fluido e frequência do sinal de comando/controle. Com estas informações é possível conhecer a resposta esperada da válvula se esta estiver funcionando corretamente. Da curva experimental obtida limitam-se as regiões de funcionamento linear do curso do carretel da válvula, as quais são aproximadas computacionalmente por funções de primeira ordem.

Após, inicia-se a etapa de monitoramento e detecção. Anteriormente, às funções de primeira ordem eram apenas atribuídas tolerâncias definidas também experimentalmente. Caso o sinal monitorado ultrapassasse estes limites impostos, uma anomalia seria então detectada. Foi proposto então, um método de detecção de mudanças abruptas com base em somas cumulativas e teste de hipóteses, cuja implementação deveria detectar desvios anormais na média do sinal monitorado. Novamente, caso este desvio ultrapassasse um valor de referência, uma falha era detectada. Estas duas técnicas foram implementadas e adaptadas ao funcionamento paralelo para que se complementassem e atingissem o objetivo comum de detectar a maioria das anomalias às quais o sistema estava sujeito.

Para validação e comparação desses sistemas de detecção, a válvula foi sujeita a condições de travamento do carretel e contaminação, algumas das falhas de funcionamento destes dispositivos que são elementares aos Reguladores de Velocidade.

Todos os ensaios foram realizados na bancada de ensaios de válvulas hidráulicas do Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos – *LASHIP* na *UFSC*. As falhas foram introduzidas no carretel da válvula de maneira

cuidadosa, visando evitar riscos de danos a outros equipamentos da bancada, principalmente devido à dificuldade de se controlar a contaminação da válvula.

1.3: Contribuições

Este trabalho e seus resultados poderão contribuir:

- Como fonte de referência para trabalhos futuros na área de monitoramento de condição e detecção de falhas em válvulas e sistemas hidráulicos;
- Como motivação para o desenvolvimento de módulos de monitoramento de estado em válvulas capazes de indicar quando o dispositivo necessita de intervenção de manutenção, reduzindo custos e a probabilidade da inserção de falhas por ações de manutenção desnecessárias;
- Pela capacidade em detectar múltiplas falhas simultâneas, mesmo que estas tenham sido originadas por razões descorrelacionadas;
- Para a monitoração da formação de deterioração de equipamentos em tempo real ao ocorrido;
- Pela capacidade de aplicação em ambientes reais, dado que o trabalho se baseou em experimentação com equipamentos utilizados pela indústria;
- Servindo como base para o estudo da extensão do sistema para outros equipamentos do sistema eletro-hidráulico de controle de posição dos reguladores de velocidade (válvula distribuidora, servomotores, etc.).

1.4: Organização do documento

O capítulo seguinte apresenta algumas informações sobre a *Reivax* e o *LASHIP*, onde foram realizadas as atividades do projeto, juntamente com uma contextualização da importância deste trabalho e, por conseguinte, do tema

manutenção preditiva para o setor eletro-hidráulico do controle da geração de energia.

O terceiro capítulo aborda o tema de supervisão de processos, alguns conceitos desta área aliado à apresentação de algumas técnicas que são utilizadas para implementação de sistemas de monitoramento *on-line*.

O quarto capítulo trata de alguns aspectos gerais sobre válvulas proporcionais eletricamente moduladas limitando-se a assuntos de maior relevância para a elaboração e compreensão deste trabalho.

No quinto capítulo é dado embasamento conceitual sobre a metodologia utilizada neste trabalho para a elaboração do sistema de monitoramento de condição. É descrito sobre a caracterização experimental da válvula e como a partir desta são gerados os sintomas (informações) do dispositivo. Também são apresentadas as técnicas utilizadas para tratar da detecção de anomalias.

O sexto capítulo traz os detalhes da implementação propriamente dita do sistema de monitoramento de condição em laboratório. São descritos os equipamentos e sistemas utilizados, bem como os ensaios de caracterização experimental da válvula e a parametrização dos métodos de detecção, conforme metodologia apresentada anteriormente.

O sétimo capítulo aborda os ensaios de validação das técnicas realizados com a válvula sob a condição de falhas. Duas falhas são avaliadas: contaminação e travamento do carretel. São apresentados os detalhes de cada ensaio, bem como os resultados de ambas as técnicas desenvolvidas no projeto para o sistema de monitoramento.

Por fim, o oitavo e último capítulo apresenta uma avaliação dos resultados obtidos frente aos objetivos traçados, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: A empresa no contexto do projeto

Neste capítulo serão dadas algumas informações dos locais de desenvolvimento deste trabalho e a importância do projeto no contexto empresarial e tecnológico.

2.1: Informações da empresa

A Reivax iniciou suas atividades em abril de 1987 e tornou-se Reivax S/A Automação e Controle em janeiro de 2008. Empresa genuinamente brasileira, se consolidou, em curto espaço de tempo, como fabricante de equipamentos para controle da geração de energia e hoje é reconhecida no mercado pela excelência de seus produtos, seu espírito inovador e experiência adquirida nas empresas de energia elétrica do Brasil e da América Latina [16].

Desenvolvedora de tecnologia própria para projeto e fabricação de sistemas de controle e regulação da geração, foi pioneira na aplicação de controladores microprocessados em sistemas de excitação de geradores e reguladores de turbinas. É a primeira fabricante com tecnologia nacional de reguladores de velocidade e tensão, gerando soluções integradas e customizadas para projetos de modernização e automação de usinas hidrelétricas, termelétricas, nucleares e pequenas centrais hidrelétricas [16].

A Reivax atua dentro do mercado de geração no segmento de controle e automação de centrais geradoras de energia, tanto no cenário nacional como no internacional. Dentro deste segmento existe uma divisão entre novas usinas e modernização de usinas já existentes. A Reivax também atua no mercado de modernização de sistemas de regulação de tensão e velocidade de geradores e turbinas para centrais de geração de energia de forma direta junto aos clientes finais. Por meio da modernização substituem-se equipamentos que já ultrapassaram sua vida útil ou se tornaram obsoletos, por equipamentos mais robustos e confiáveis. Essa substituição leva ao aumento da confiabilidade e da produtividade do processo de geração de energia elétrica. Em novas usinas, a

Reivax atua como sub-fornecedora, posto que tais empreendimentos exigem fornecedores capazes de suprir não somente os controladores para as turbinas e geradores, assim como todos os eletromecânicos e as obras civis [16].

De forma geral, os principais segmentos de atuação em geração de energia são [16]:

- Centrais Geradoras Hidrelétricas (potência total de até 1 MW);
- Pequenas Centrais Hidrelétricas (potência total de até 30 MW);
- Usinas Hidrelétricas (potência total maior a 30 MW);
- Usinas Termelétricas;
- Usinas Termonucleares;
- Usinas Eólicas.

O presente trabalho foi executado em cooperação com o LASHIP – Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. O LASHIP conta com atualmente com cerca de 15 integrantes dentre professores, engenheiros, pós-graduandos (mestrandos e doutorandos) e estudantes de graduação vinculados por meio de projetos institucionais e com a indústria. O LASHIP tem atuado em diversos projetos de pesquisa tecnológica financiados por diversas empresas e/ou com instituições de fomento. Possui uma área total de 440m² incluindo laboratórios de hidráulica e pneumática [12].

2.2: Regulação de velocidade e motivação para o projeto

Um dos principais subsistemas de centrais hidrelétricas e que influencia diretamente na qualidade da energia gerada é o de regulação de velocidade. Além do controlador propriamente dito, compreende na parte de atuação, um circuito eletro-hidráulico composto de cilindro(s) hidráulico(s), válvula distribuidora e/ou válvula direcional proporcional, formando um sistema de controle de posição com malhas fechadas de controle. Adicionalmente malhas externas fazem com que o sistema siga a velocidade e a potência de referência

da turbina como consequência do posicionamento alcançado das pás, no caso de turbinas de reação, e de agulhas e defletores, em turbinas de ação. O regulador de velocidade em si é um dispositivo que realiza aquisição de dados, implementa as funções de controle e gera os sinais de saída para as válvulas.

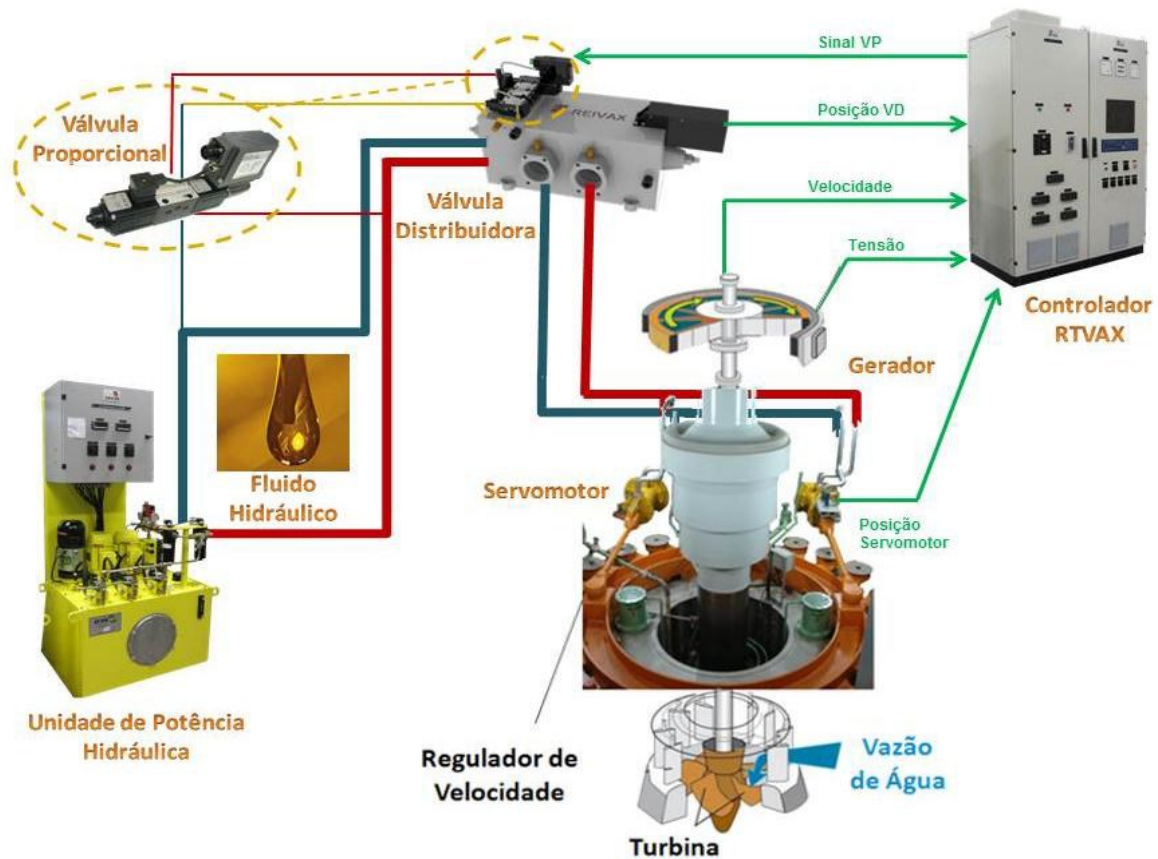


Figura 2.1 - Principais componentes de um sistema de regulação de velocidade de turbinas hidráulicas [15].

Uma falha na operação deste tipo de sistema pode estar associada à válvula proporcional que controla o posicionamento da válvula distribuidora, à válvula distribuidora que controla a posição do servomotor (cilindro) e/ou a este último. Como esse é um sistema com tripla realimentação, o controlador implementado no regulador de velocidade corrige automaticamente os sinais de comando, de forma que falhas em estágio inicial em um destes componentes normalmente não são observadas na regulação da velocidade da turbina. Com a implementação de uma função de monitoração operacional *on-*

line em um regulador de velocidade, seria possível a identificação de condições anormais de operação nos componentes, possibilitando a programação de parada de máquina e a realização de manutenção antes da ocorrência de uma falha.

A fase inicial do projeto, a qual este trabalho se dedica, consiste em investigar, desenvolver e experimentar técnicas que sirvam como base para a implementação de uma função de monitoramento de condição com baixo custo computacional para uma válvula proporcional, cujo modelo é usado como componente dos reguladores de velocidade comercializados pela empresa.

Vale destacar que a manutenção baseada em condição (*CBM – Condition-Based Monitoring*), ou manutenção preditiva, apresenta-se como uma solução conveniente para garantir a disponibilidade do sistema hidráulico em centrais hidrelétricas. Sabe-se que a vida útil de componentes hidráulicos é bastante longa e varia com as condições de uso [4], de tal forma que se torna difícil fazer uma programação precisa dos intervalos ideais de manutenção e, assim, aplicar um plano de manutenção preventiva. Da mesma forma, a modelagem confiabilística do sistema (baseada na análise estatística de falha) é difícil de ser realizada pela indisponibilidade de dados razoavelmente precisos das taxas de falhas de componentes hidráulicos.

2.3: Relevância do trabalho no contexto empresarial

Os custos da energia elétrica estão entre as dificuldades estruturais identificadas em nosso país. O sucesso deste trabalho, que engloba um projeto maior discutido na seção anterior, permitirá uma operação e manutenção mais segura e econômica dos controladores da geração de energia e seus dispositivos associados, sendo a aplicação inicial em hidrelétricas, dominantes em nossa geração.

Com as tendências atuais há cada vez menos especialistas nas empresas capazes de conduzir os processos de manutenção dos equipamentos. Os contratos de fornecimento de energia apresentam cláusulas

com penalizações duras no caso de descumprimento na entrega da energia, por algum problema imprevisto. Nesse contexto, um sistema com a funcionalidade de monitoramento de condição operacional de seus sub-componentes evitará muitas das paradas intempestivas das máquinas que provocam perdas por lucro cessante à empresa geradora (além das multas já referidas por descumprimento contratual) e perdas significativas de produção das indústrias consumidoras dessa energia. Há ainda o efeito secundário no uso eficiente da energia dentro das instalações que serão atendidas, pois, muitas vezes, antes da falha, esses equipamentos operam de forma pouco eficiente do ponto de vista energético.

Assim, o resultado deste trabalho para as áreas prioritárias de interesse do setor empresarial e tecnológico visa servir como base de apoio para soluções que permitam uma redução de custos na operação e manutenção nos controladores das usinas geradoras de energia, que possam ser expandidas para outros equipamentos, permitindo economia e maior lucro na atividade, assim como maior confiabilidade aos consumidores. A ação do mercado deve conduzir ao barateamento dos custos de energia pagos pelos consumidores, como às demais indústrias.

Capítulo 3: Sistemas de monitoramento e detecção de falhas

Neste capítulo é formalizado o problema da supervisão e monitoramento de processos industriais, definidos alguns conceitos básicos ao entendimento da área, e apresentadas algumas ferramentas usadas para a detecção de falhas em sistemas dinâmicos.

3.1: Supervisão e monitoramento de processos

A supervisão e monitoramento de condição de um processo tem o objetivo de mostrar, como o próprio nome diz a presente condição, ou estado do mesmo, incluindo as características não desejadas e não permitidas. Além disso, a supervisão tem como uma de suas principais funções atuar de forma a evitar danos ou acidentes. Os desvios do comportamento normal podem ser usados para prever e informar as necessidades de manutenção do processo, sendo atribuídos a distúrbios ou erros que podem ser causados por várias razões. Eles podem resultar em períodos curtos ou longos de mau funcionamento do sistema ou até mesmo falhas, caso nenhuma contra-ação seja tomada. A Figura 3.1 abaixo apresenta, em forma de diagrama de blocos, um processo supervisionado acoplado a um sistema de detecção de falha (*Fault Detection System*).

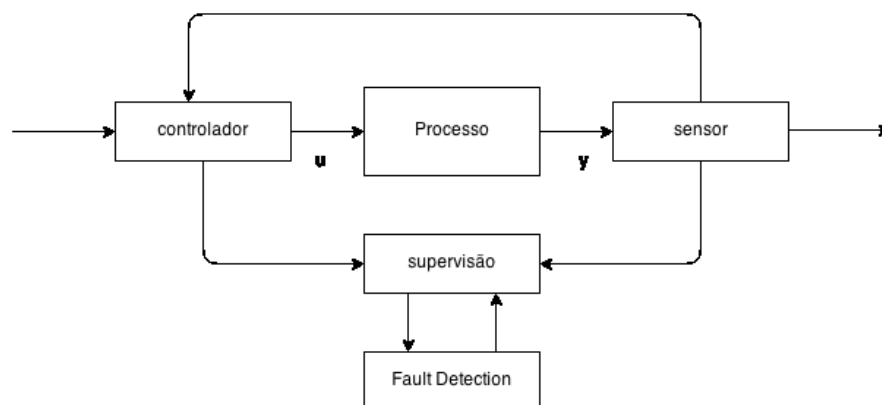


Figura 3.1 – Esquema de conexões de um processo supervisionado com um sistema de detecção de anomalias.

3.2: Conceitos sobre falhas

Nesta seção são apresentados alguns conceitos na área de detecção e diagnóstico de falhas a serem usados principalmente para estudo e classificação de anomalias. Apesar deste trabalho não tratar da etapa de *isolamento* de um sistema de diagnóstico de falhas, essas informações podem ser relevantes ao entendimento de alguns fenômenos ocorridos durante os ensaios de validação do sistema de detecção, e como justificativas de resultados apresentados pelo mesmo. Para mais informações pode-se consultar [10]:

3.2.1: Faltas, falhas e mau funcionamento.

Na literatura, os autores diferem quanto à definição. Segundo [10]:

- **Falta** é um desvio não permitido de pelo menos uma característica do sistema a partir do aceitável, usual, ou condição padrão. Este desvio não permitido é a diferença entre o valor da falta e o limite violado da zona de tolerância para seu valor usual.
- **Falha** é uma interrupção permanente da habilidade do sistema em executar uma determinada função sob certas condições de operação. Uma falha é a *terminação* da habilidade de uma unidade funcional de executar uma função requerida. Esta pode resultar de uma ou mais faltas.
- **Mau funcionamento** é uma irregularidade intermitente na execução da função desejada do sistema.

Em geral, o termo “*falta*” é utilizado para designar um leve desvio do funcionamento normal do processo, mas que permita que o mesmo ainda realize as funções para o qual foi projetado. Já o termo “*falha*” é utilizado para interrupções permanentes, ou seja, que impedem o sistema de executar suas tarefas.

Neste trabalho consideram-se faltas e falhas sendo situações indesejadas, independente da capacidade do processo poder ou não executar suas funções. Visto que o sistema ainda não é capaz de quantificar o desvio observado, este pode ser interpretado pelo operador da maneira mais apropriada para o equipamento em questão. A preocupação em alertar automaticamente que o processo apresenta alguma anomalia com alto grau de certeza foi a prioridade no desenvolvimento deste trabalho.

3.2.2: Classificação de falhas

1. Quanto ao tipo de sinal:

- a) **Falhas aditivas** - ocorrem quando há a adição de um valor ao valor real de uma variável. Em geral, aparecem quando o valor observado é diferente do real, isto é, apresenta um *bias*, *offset*;
- b) **Falhas multiplicativas** - quando um valor é multiplicado à variável. Um exemplo comum é a mudança de parâmetros de um processo.



Figura 3.2 – Tipo de sinal de falha: aditiva e multiplicativa [5].

2. Quanto à evolução temporal:

- a) **Falhas abruptas** - falhas rápidas e caracterizadas pela atuação de algum distúrbio no processo. As falhas abruptas ocorrem instantaneamente e são normalmente persistentes no tempo;
- b) **Falhas incipientes** - falhas caracterizadas por uma mudança gradual no valor médio de uma variável como uma tendência (*drift*). Representam evoluções lentas no tempo e são mais

difíceis de detectar embora apresentem, na fase inicial, menor severidade;

- c) **Falhas intermitentes** - falhas que aparecem e desaparecem rapidamente sem que ocorra qualquer ação de correção, com comportamento semelhante a pulsos temporais.

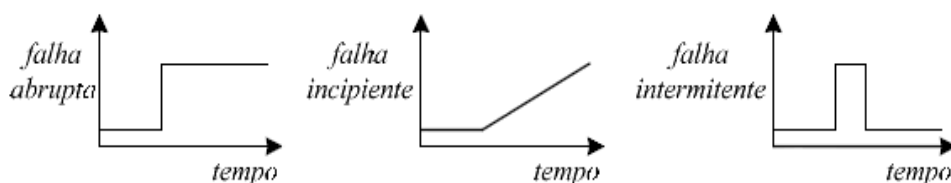


Figura 3.3 – Tipo de falhas em função de suas características temporais [5].

Existem outras classificações para falhas, como por exemplo, quanto a sua localização, as quais podem ser estudadas mais a fundo em [10].

3.3: Características de sistemas de monitoramento *on-line*

Segundo [10], as principais características de um sistema de monitoramento de condição são listadas a seguir:

- Rapidez na detecção;
- Robustez;
- Identificação de novas falhas;
- Adaptabilidade;
- Capacidade de armazenagem de dados e computação;
- Identificação de múltiplas falhas.

Os autores reconhecem que é difícil um sistema de monitoramento de condição ser excelente em todas as características, dada a não linearidade das falhas e a natureza da interação entre elas.

O número de funções que um sistema de detecção é capaz de executar depende da complexidade do processo, do tempo disponível para a execução das funções, dos recursos disponíveis para a execução das mesmas e da

complexidade do próprio sistema [4]. No caso particular dos sistemas de monitoramento de condição embarcados em sistemas com outras funções, a detecção deve ser realizada prioritariamente enquanto o sistema está executando funções críticas (como controle) e, portanto, é desejável mantê-los o mais simples possível. Uma tentativa de detectar todas as falhas possíveis aumentaria a complexidade total do sistema e diminuiria seu tempo de resposta. Por este motivo estes sistemas quando embarcados são projetados para detectar rapidamente apenas as falhas mais ocorrentes para não comprometer a segurança do sistema. No entanto, a segurança não será comprometida se testes funcionais mais completos forem executados periodicamente [4].

Além disso, deve-se considerar que um sistema de monitoramento apresenta não um, mas uma sequência de etapas para a condução de dados, desde a aquisição dos sinais até a informação da condição do sistema, sendo estas:

- Aquisição de dados (sensoriamento);
- Pré-processamento (condicionamento de sinais);
- Representação (tratamento para extração de informações e indicadores da condição do sinal com confiabilidade);
- Avaliação e resposta (tomada de decisão segundo avaliação da informação obtida na etapa anterior).

3.4: Métodos de detecção de falhas *on-line*

Diversas são as técnicas já utilizadas na construção de ferramentas com o objetivo de detectar falhas em processos industriais. Abaixo são listadas brevemente algumas destas técnicas que serviram como base para a escolha das soluções a serem explanadas no capítulo seguinte: as baseadas em modelos para geração de sintomas, as que verificam a ultrapassagem de limites, e alguns métodos que utilizam abordagem estatística, tratando falhas como um problema de detecção de mudanças abruptas.

Métodos baseados em modelo utilizam a dependência analítica de sinais de entrada e saída expressos por equações diferenciais geralmente de um modelo espaço-estado que representa teoricamente um determinado processo. A detecção de falhas provém da alteração que estas provocam em sinais resultados da comparação de dados reais com um modelo válido do processo. O uso destes modelos permite a estimação de variáveis e parâmetros que podem ser influenciados por falhas e usados como indicadores. Tolerâncias então podem ser estipuladas baseadas em algum critério para que a detecção antecipada possa ser realizada. Exemplos de técnicas baseadas em modelo utilizam, por exemplo, identificação de processos, observadores, filtragem adaptativa, equações de paridade e podem ser mais bem entendidas em [1] ou [10].

Métodos por verificação de limites monitoram variáveis de processos que são comparadas com valores limites ou *thresholds*. A indicação de falha ocorre no caso da ultrapassagem de algum destes valores que são selecionados a partir de experiências e geralmente apresentam alguma margem de segurança. Este tipo de verificação, apesar de muito utilizado, é bastante simplificado. Na prática, nem sempre que o sinal ultrapassa um dos limites significa a presença de uma falha e, nesses casos, os alarmes são gerados desnecessariamente. Este método pode ser usado em conjunto com métodos baseados em modelos explanados no item anterior. Para que uma falha seja adequadamente detectada, evitando falsos alarmes e não detecções, o modelo deve incluir as variações que o comportamento do equipamento pode sofrer dentro dos limites da normalidade com a variação das condições de operação. Para acomodar tais variações, podem ser usados limites dinâmicos (*threshold* adaptativo) a partir de uma referência gerada pelo modelo [4]. Assim, caso haja mudança no ponto de operação, por exemplo, os limites que acompanham o sinal se adaptam ao sinal medido de forma automática, conforme a Figura 3.4.

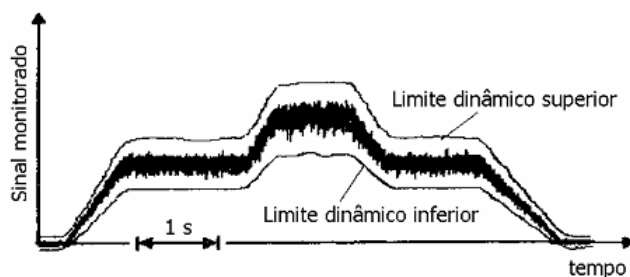


Figura 3.4 – Limites adaptativos [4].

Métodos que utilizam abordagem estatística se utilizam de ferramentas de decisão estatística para avaliar a ocorrência de falhas a partir da detecção de mudanças abruptas nas propriedades estatísticas de um sinal monitorado. Em geral, é necessário que se tenha algum conhecimento sobre a propriedade antes da mudança. No caso da propriedade ser a média, a normalização dos dados pode ajudar nesta informação, dado que sinais gaussianos apresentam valores nulos para este dado estatístico. Estes métodos de detecção têm sido utilizados largamente nos últimos anos em conjunto com métodos baseados em modelo, principalmente porque as falhas, em especial, as aditivas provocam mudanças na média dos resíduos obtidos [11]. Exemplos de métodos de detecção de mudanças abruptas se utilizam de somas cumulativas (funções de verossimilhança), teste de hipóteses e/ou algoritmos bayesianos. Mais informações são encontradas em [3].

Capítulo 4: Válvulas proporcionais eletricamente moduladas

Nesta seção são descritas algumas características e aspectos construtivos de válvulas proporcionais, limitando-se ao âmbito necessário para o entendimento deste trabalho.

4.1: Circuitos hidráulicos e válvulas proporcionais

Um circuito hidráulico possui duas partes básicas [8] - o circuito de atuação e o circuito da unidade de potência. O circuito de atuação engloba as partes que promovem a atuação sobre a carga, que comumente inclui válvula direcional e cilindro, enquanto que o circuito da unidade de potência é o responsável pelo suprimento, sob determinada pressão e vazão, de energia hidráulica para os circuitos de atuação, constituindo-se basicamente de reservatório, bomba, válvula de alívio e filtro. A interação entre estes componentes é complexa, e todos estão interligados pelo óleo/fluido hidráulico.

Dentre os tipos de sistemas existentes, os de controle eletro-hidráulico utilizam sinais elétricos de baixa potência para controlar precisamente os movimentos de grandes atuadores hidráulicos. A interface entre o equipamento elétrico de controle e o equipamento hidráulico de potência são as válvulas hidráulicas eletricamente moduladas [4].

A tecnologia das válvulas proporcionais vem sendo cada vez mais empregada devido as suas características de unir as vantagens da força hidráulica com a precisão e flexibilidade proporcionada pelos comandos eletrônicos, a um custo relativamente baixo.

No âmbito dos sistemas hidráulicos, estes dispositivos movem seu carretel permitindo a vazão direcional de óleo de maneira proporcional a um sinal de comando. Elas fazem uso de um ou dois solenóides para mover o carretel em oposição a um conjunto de molas balanceadas. A repetibilidade do posicionamento do carretel é uma função da simetria das molas e da habilidade do projeto em minimizar efeitos não lineares como histerese e atrito [4]. Neste

sentido, para melhorar o desempenho incorpora-se a realimentação da posição de elementos internos da válvula, a partir de transdutores de posição e circuitos eletrônicos dedicados instalados em cartelas eletrônicas [8].

Abaixo pode ser visto a seção transversal de uma válvula proporcional com dois solenóides, evidenciando alguns de seus aspectos construtivos a serem comentados a seguir.

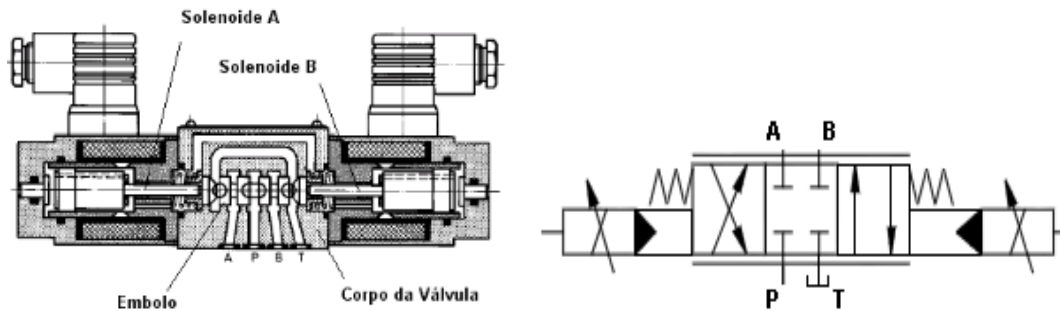


Figura 4.1 – Válvula Parker com dois solenóides e simbologia [15].

4.2: Aspectos construtivos de válvulas proporcionais

4.2.1: Acionamento por solenóide proporcional

Solenóides proporcionais são usados para o acionamento (conversor eletro-mecânico) das válvulas cuja característica de deslizamento do carretel e conseqüentemente da vazão pelos orifícios desejada seja proporcional ao sinal de comando aplicado.

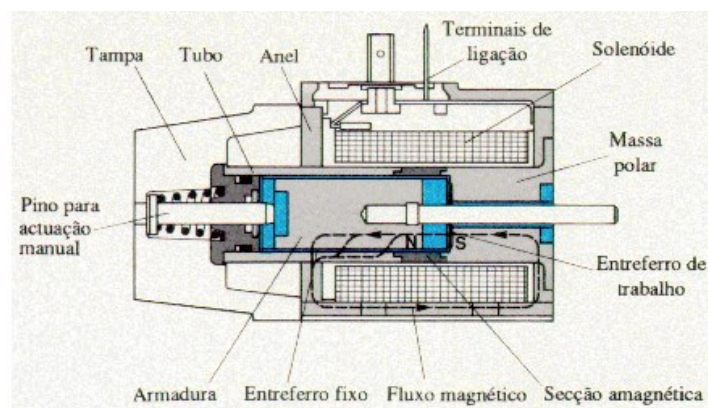


Figura 4.2 – Detalhe construtivo de um solenóide proporcional [15].

O solenóide proporcional consiste em um solenóide de corrente contínua, no qual um tubo-guia (conforme Figura 4.2 acima) é composto de material ferromagnético e é separado da massa polar por um anel intermediário de material diamagnético (não magnetizável), visando produzir uma orientação adequada das linhas de campo magnético através da armadura, que permita manter a força relativamente constante em relação ao curso do núcleo para diferentes valores de corrente elétrica de excitação (entrada) [4]. Assim, quando a corrente é alterada, a força sofre variação proporcional, mas se mantém relativamente constante para deslocamentos dentro da faixa de linearidade, conforme a Figura 4.3.

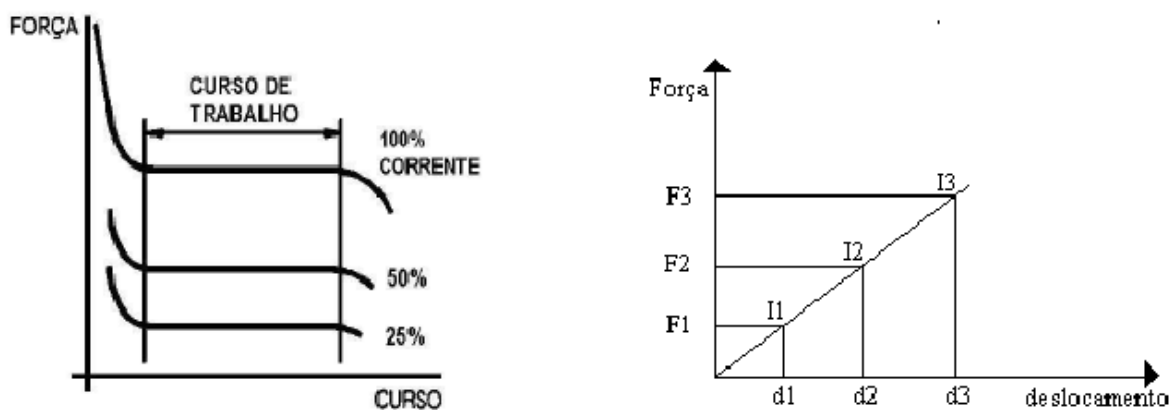


Figura 4.3 – Característica força-deslocamento em solenoides proporcionais [15].

Esta força move o carretel até que um balanço entre a força do solenóide e a força de mola da válvula seja encontrado.

Um efeito do uso de material ferromagnético no solenoide é a histerese, uma medida da não coincidência das curvas crescente e decrescente, observadas nos sinais medidos, como pode ser visto na Figura 4.4. Essa característica se deve também aos atritos dinâmicos e estáticos, mas principalmente ao magnetismo residual, fruto da propriedade de remanência que certos materiais ferromagnéticos apresentam após serem submetidos a campo magnético externo. Mais informações podem ser encontradas em [4] e [6].

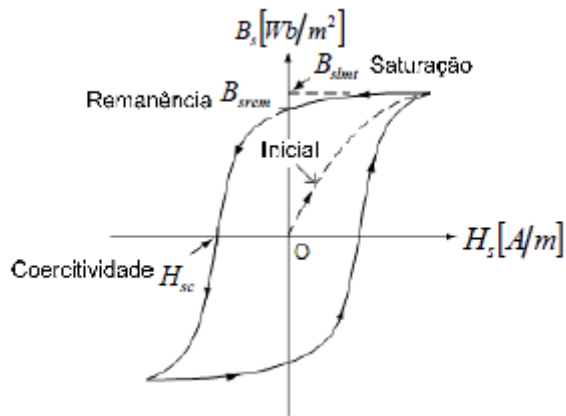


Figura 4.4 – Curva de histerese de material ferromagnético [4].

4.2.2: Carretel e geometria da válvula

Carretéis de válvulas proporcionais de quatro vias podem apresentar três ou quatro ressaltos. Os orifícios que controlam a passagem de fluido são definidos pelo deslocamento do carretel, movimentando os ressaltos em relação aos respectivos pórticos [8]. A Figura 4.5 abaixo apresenta o detalhe do ressalto do carretel e os pórticos, e nos serve de apoio para definir características construtivas quanto a:

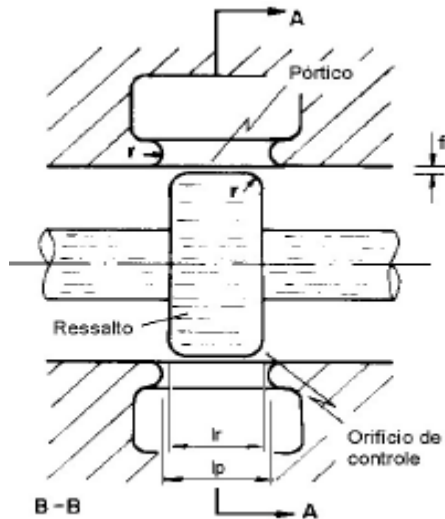


Figura 4.5 – Detalhe do ressalto e pórtico retangular em válvula carretel [8].

- a) **Forma do pórtico:** Pode ter diferentes formatos como circular, triangular ou retangular. Na Figura 4.5, “ l_p ” corresponde ao comprimento (perímetro) do pórtico.
- b) **Geometria da válvula:** Toda válvula possui folga radial “ f_r ” entre o ressalto e a camisa (corpo) e os cantos dos ressaltos e dos pórticos são arredondados com raio “ r ”.
- c) **Tipo de sobreposição do carretel:** Relaciona a diferença entre o comprimento do ressalto “ l_r ” e o comprimento do pórtico “ l_p ”:
- **Sobreposição positiva (supercrítica):** nesta existe uma zona morta na região central da válvula, ou seja, nesta região, mesmo que o carretel desloque em função de um nível de sinal o fluxo permanecerá em zero ($l_r > l_p$).
 - **Sobreposição zero (crítica):** nesta não existe zona morta, ou seja, qualquer alteração do sinal provocará o deslocamento do carretel e conseqüentemente vazão de controle ($l_r = l_p$).
 - **Sobreposição negativa (subcrítica):** neste tipo, existe vazão seja qual for a posição do carretel, e uma pequena variação de sinal já provocará grandes variações da vazão ($l_r < l_p$).

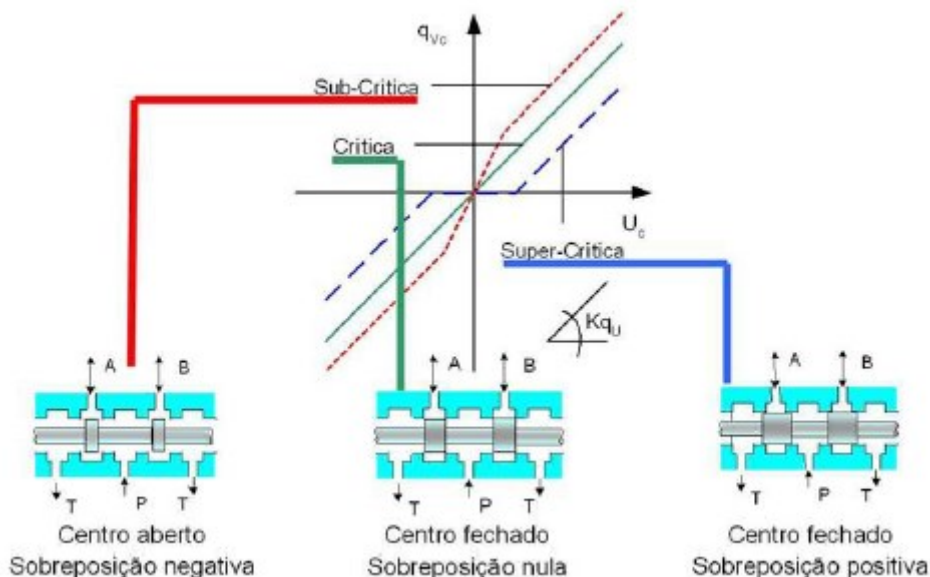


Figura 4.6 – Tipos de sobreposição do carretel e respectivos centros de válvula [14].

Para a escolha da válvula adequada segundo comportamento do carretel, curvas características são fornecidas pelos fabricantes de modo que se possa optar pelo modelo cujo desempenho seja conveniente para a aplicação da válvula.

Um bom exemplo é a curva que apresenta a vazão da válvula em função do sinal de comando para determinada diferença de pressão, como mostrado abaixo.

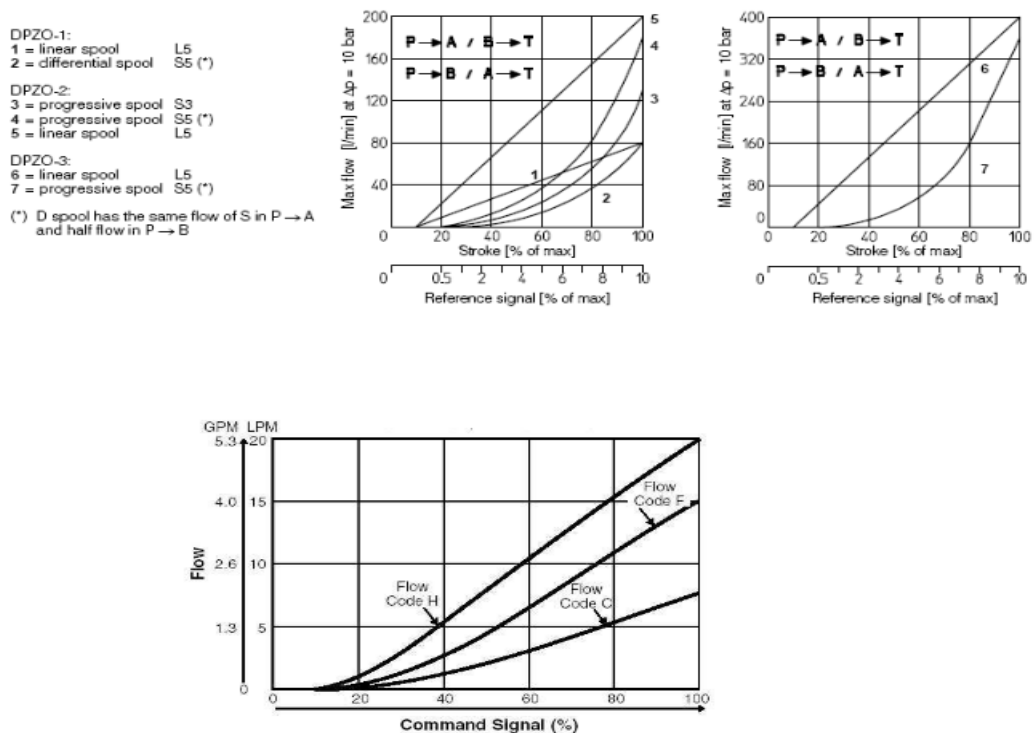


Figura 4.7 – Curvas de vazão em função do sinal de comando dado à válvula proveniente do manual do fabricante [2].

4.3: Forças que atuam em uma válvula carretel

Para movimentar o carretel é necessário vencer esforços decorrentes principalmente da aceleração e desaceleração (forças inerciais), do atrito da camisa (corpo) da válvula com o carretel e de forças devido ao escoamento do fluido através dos orifícios de controle e nas câmaras da válvula [8]. Outra

parcela de força que pode ser considerada é a força devido a molas de centralização [4].

As **Forças inerciais** provocam a aceleração e desaceleração da massa do carretel juntamente com a massa de quaisquer peças sólidas que estejam ligadas a ele (partes móveis do solenóide, pinos e outros), assim como um terço da massa de cada mola atuando sobre o carretel. Além disso, a aceleração de um carretel usualmente envolve também a aceleração de alguma quantidade de fluido [4].

A **Força de atrito** presente em válvulas resulta da combinação do atrito estático, de Coulomb, e viscoso, proporcionando um comportamento semelhante ao mostrado na Figura 4.8 abaixo.

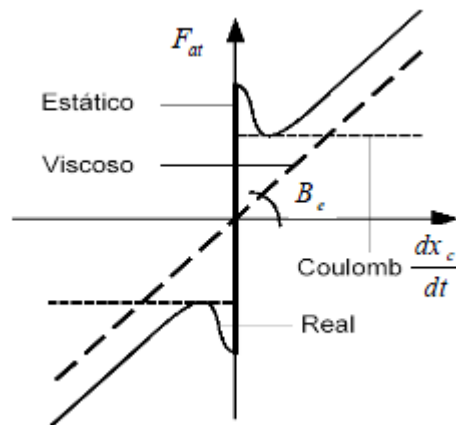


Figura 4.8 – Forças de Atrito em componentes hidráulicos [8].

Onde B_e representa o coeficiente de atrito viscoso.

Precauções devem ser tomadas a fim de que a força de atrito não seja subestimada. No projeto de válvulas carretel, tais precauções envolvem medidas para evitar o trancamento hidráulico, a correção dos eixos, circularidade e o acabamento das superfícies [4]. O trancamento hidráulico pode ser descrito como um fenômeno causado pelas forças radiais ocasionadas pelo vazamento interno através dos ressalto do carretel [4].

Estas forças causam atrito excessivo provocando desta forma o referido trancamento.

Se o carretel e a camisa fossem perfeitamente cilíndricos isto não aconteceria, mas na prática é impossível conseguir tal acabamento. Sendo assim, essas forças são usualmente compensadas através da confecção de entalhes circunferenciais nos ressaltos do carretel (*grooves*). Estes entalhes permitem vazão em torno da circunferência do carretel das áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão, equalizando tais pressões e centralizando o carretel [4].

Ainda segundo [4], um entalhe é capaz de reduzir as forças radiais a 40% da existente em um carretel sem entalhe. Três entalhes baixariam este valor para 6%, ao passo que sete baixariam para 2.7%. Para tal resultado, tanto a largura quanto a profundidade dos entalhes devem ser de pelo menos dez vezes a folga radial, e suas paredes devem ser perpendiculares à camisa para evitar o acúmulo excessivo de partículas de sujeira. Além de reduzirem as forças radiais, os entalhes também reduzem o vazamento interno através da centralização do carretel e servem como reservatório para partículas que poderiam causar atrito ou mesmo trancamento do carretel contra a camisa. Mais detalhes sobre estas forças radiais e sobre a aplicação destes entalhes podem ser encontrados em [4].



Figura 4.9 – Detalhe dos entalhes em um ressalto do carretel.

As **Forças de escoamento** são decorrentes da modificação da quantidade de movimento do fluido ao passar pelo orifício de controle da

válvula. Estas são proporcionais à área do orifício (e por consequência ao deslocamento do carretel), à vazão, e à queda de pressão na válvula, e compreendem-se entre as principais forças a serem vencidas para a movimentação do carretel, podendo inclusive impor limites quanto ao acionamento eletromecânico (solenoide proporcional) da válvula [4].

4.4: Variação da vazão nos orifícios da válvula

A equação da vazão que passa pelos orifícios A e B da válvula da Figura 4.1 em seu regime permanente mostra a dependência desta quanto à variação da pressão em suas câmaras.

$$q_v = K_v \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

onde:

$$K_v = cdA_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (2)$$

é o coeficiente de vazão da válvula, tal que:

- A_0 é a área do orifício, que depende da geometria dos orifícios e da posição do carretel;
- cd é o coeficiente de descarga;
- ρ é a massa específica do fluido.

Ademais, Δp corresponde à queda de pressão entre os orifícios A e B da válvula.

Da equação (1), pode-se levantar que a vazão depende da geometria dos orifícios de controle e varia não linearmente com a queda de pressão entre eles.

4.5: Eletrônica embarcada

Consistem em placas eletrônicas responsáveis pela geração do sinal de controle da abertura ou fechamento da válvula proporcional. Somente é preciso alimentar a placa eletrônica interna através de um conector e enviar o sinal de comando correspondente. As válvulas que apresentam esta tecnologia em geral possuem um sensor de detecção de posição do curso do carretel e a eletrônica integrada é responsável por corrigir qualquer erro no posicionamento da válvula para responder com o máximo de exatidão e repetibilidade ao sinal de comando. Esta malha de controle de posição simplificada está representada pelo diagrama da Figura 4.10.

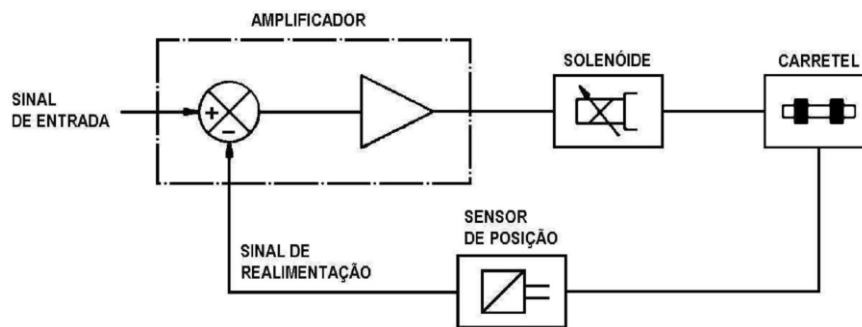


Figura 4.10 - Controle Automático de posição realizado pela eletrônica embarcada da válvula [15].

O sensor que verifica a posição e envia um sinal correspondente para o amplificador é denominado *LVDT* (*“Linear Voltage Differential Transformer”*) ou transformador linear de tensão diferencial. A principal vantagem do princípio do LVDT sobre outros tipos de transdutores de deslocamento está no seu alto grau de robustez [13]. Isso se deve à inexistência de contato físico do elemento sensor e por isso o desgaste é zero. Isso também significa que ele pode ser feito à prova de água e óleo, de forma a se ajustar a diversas aplicações.

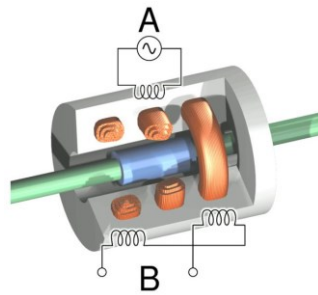
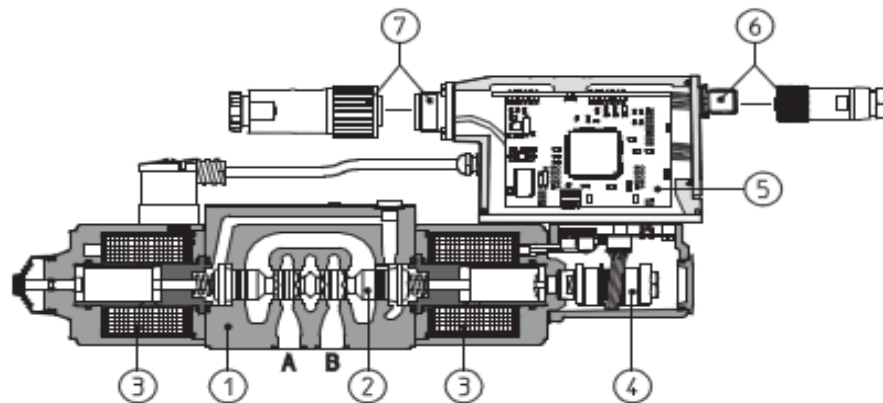


Figura 4.11 – Vista em corte de um LVDT [13].

A Figura 4.12 a seguir apresenta o diagrama da válvula utilizada neste trabalho, apresentando sua eletrônica embarcada.



- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| ① Valve body | ⑤ Integral electronics |
| ② Spool | ⑥ Communication connector |
| ③ Proportional solenoid | ⑦ Main connector |
| ④ Position transducer | |

Figura 4.12 – Vista em corte da Válvula ATOS DHZ0-TE-071-L5-I 40 e sua eletrônica embarcada [2].

Capítulo 5: Metodologia para implementação do sistema de monitoramento de condição

Neste capítulo é descrita a metodologia conceitual utilizada para o desenvolvimento do sistema de monitoramento *on-line* de condição. É pretendido dar o embasamento conceitual necessário ao entendimento dos ensaios realizados para caracterização experimental da válvula e para validação dos métodos de detecção que serão descritos nos capítulos seguintes.

5.1: Caracterização experimental da válvula

A elaboração de um modelo do funcionamento experimental capaz de prover informações sobre as condições operacionais da válvula foi adotado devido este ser relativamente simples de se obter, à dificuldade em se validar um modelo teórico devido às não linearidades tanto intrínsecas ao funcionamento da válvula, como àquelas relativas às perdas de carga e aos vazamentos no circuito hidráulico. Além disso, as incertezas e a falta de informação em catálogos de equipamentos sobre os parâmetros necessários ao equacionamento dinâmico do sistema serviram de motivação à caracterização experimental do equipamento. Ainda, ao fato de se dispor de poucos dados quantitativos sobre as falhas da válvula utilizada neste trabalho em laboratório ou mesmo em campo reforça a escolha desta abordagem, que necessita apenas de conhecimento sobre o funcionamento da válvula e de uma unidade deste dispositivo em boas condições operacionais (“saudável”) para os ensaios de caracterização e validação do modelo.

Os sinais necessários para se levantar o modelo experimental proposto neste trabalho são o sinal de comando à válvula (U_c) e o sinal da posição do carretel (x_v , em Volts), este proveniente da leitura do sensor LVDT disponível na própria eletrônica da válvula. Um sinal de comando senoidal com amplitude equivalente a cobrir toda faixa de funcionamento (deslocamento do carretel) é

aplicado à válvula e as respectivas posições do carretel mensuradas. O resultado é, portanto, um mapeamento do comportamento característico entrada-saída ($U_c \times x_v$) da válvula.

A Figura 5.1 abaixo apresenta um exemplo de uma curva que representa esse comportamento para determinada condição de operação.

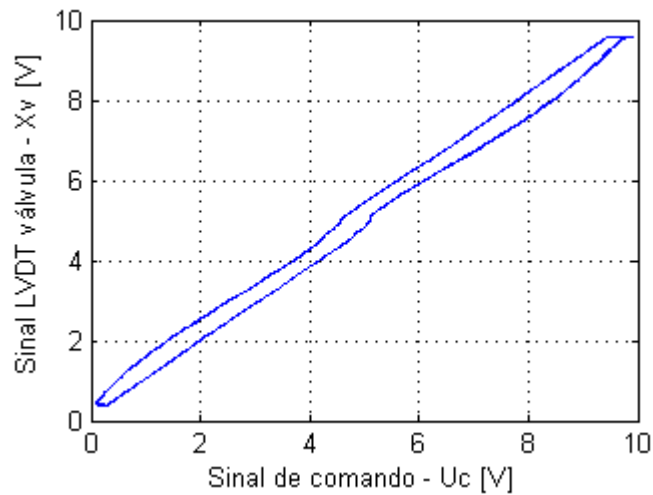


Figura 5.1 – Curva experimental obtida via aplicação de um sinal de comando senoidal de baixa frequência (0.1 Hz) à válvula em determinada condição de operação.

Para que esta curva possa ser usada como característica de funcionamento correto, ela é avaliada sobre a variação de grandezas consideradas de relevância para o acompanhamento das condições operacionais da válvula. Estes são:

- Diferença de pressão na válvula;
- Temperatura do fluido hidráulico;
- Frequência do sinal de comando.

Sendo assim, ensaios de validação são realizados, com a válvula em malha fechada de posição do carretel (inerente à eletrônica da válvula), frente à variação dessas grandezas, para verificar a sensibilidade e a robustez desta curva em representar o comportamento operacional da válvula.

Caso essa curva de comportamento não se altere ou pouco se modifique, ela pode ser usada como modelo do comportamento da válvula em bom estado de funcionamento (ou funcionamento “saudável”).

5.2: Geração da Informação de Condição

Sabe-se de [4] que a força necessária para acionar o carretel é razoavelmente linear nos movimentos de deslocamento positivo e negativo da válvula. Na curva da Figura 5.1 pode-se notar essa linearidade. Será visto nos ensaios de validação que esta característica permanece mesmo sob variação das condições operacionais dadas as grandezas listadas na seção anterior. Pode-se então aproveitar este fato para retirar informações sobre a condição de “saúde” da válvula nestas faixas de operação.

A metodologia para tal consiste em selecionar, através da análise do sinal senoidal de entrada U_c , e da curva experimental ($U_c \times x_v$), o intervalo de tempo para os qual o deslocamento da válvula é positivo (subida da senóide, no sentido de 0V para 10V) e outro tal que o deslocamento é negativo (descida, de 10 V para 0 V), desconsiderando os pontos que estão fora da faixa considerada linear, segundo a curva experimental, e aqueles que indicam mudança de direção do carretel, para os quais este não se moveu mesmo com a solicitação do sinal de entrada. Assim, determinou-se o intervalo de subida e descida no sinal de comando U_c , e conseqüentemente para sua correspondente posição do carretel x_v , no mesmo intervalo. As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram essa metodologia.

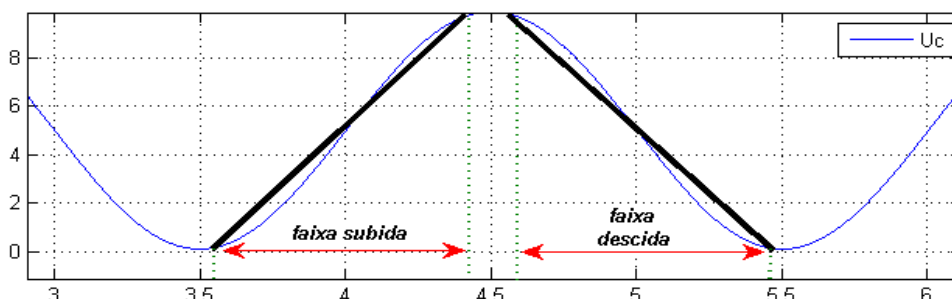


Figura 5.2 – Determinação do intervalo de operação linear da válvula no sinal de comando.

Abaixo o correspondente intervalo acima sobre a curva (U_c, x_v) da Figura 5.1.

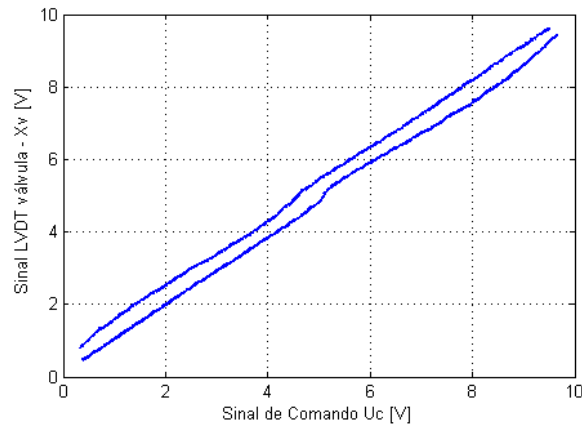


Figura 5.3 – Intervalos determinados lineares de operação na curva característica da válvula.

Através de ferramentas de software como o *Matlab* é possível encontrar a curva (reta) que melhor representa o conjunto de pontos no intervalo selecionado para o par (U_c, x_v) . O resultado são funções de primeira ordem (do tipo $x_v = aU_c + b$) que aproximam o comportamento da válvula em sua faixa considerada linear de operação. A Figura 5.4 mostra um exemplo do resultado desta linearização.

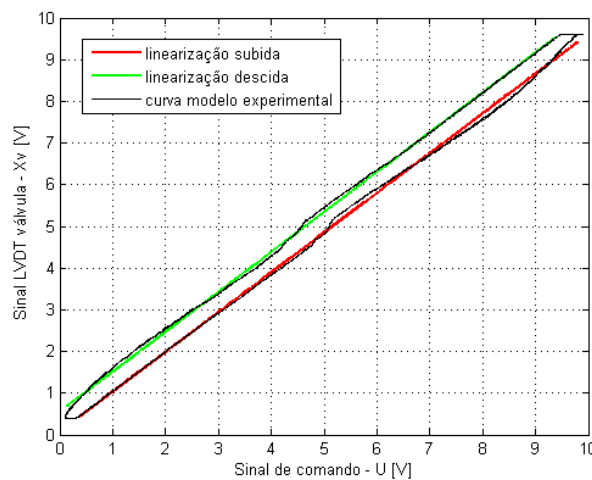


Figura 5.4 – Linearização das curvas de subida e descida de deslocamento do carretel da curva característica experimental da válvula.

Essas funções servem como um modelo aproximado do comportamento da válvula nos intervalos selecionados, com a vantagem de serem muito simples de se obter dadas as ferramentas de ajuste de dados existentes. Além disso, o custo computacional de se utilizar coeficientes de polinômios é muito menor do que memorizar conjuntos de dados para cada ponto de operação do sistema.

A geração de informação ou condição do sistema pode consistir então, por exemplo, no resíduo entre o valor lido de posição do carretel x_v pelo sensor *LVDT* da válvula e o valor correspondente x_{vlin} da função-modelo linear de subida ou descida que, para dado sinal de comando U_c no intervalo considerado, são tais que:

$$x_{vlin_s} = a_s U_c + b_s \quad (3)$$

$$x_{vlin_d} = a_d U_c + b_d \quad (4)$$

Onde os únicos valores a serem usados pelo sistema são os coeficientes a_s, a_d, b_s e b_d . Maiores detalhes serão explicados no próximo capítulo na seção 6.2.

5.3: Abordagens para detecção de falhas

Nesta seção será abordado como as informações obtidas através das curvas de caracterização experimental são utilizadas para a detecção de falhas e de comportamentos inesperados na válvula proporcional. Dois métodos são apresentados, a técnica que estava sendo elaborada até então, e o método alternativo proposto para complementar o anterior.

5.3.1: Verificação de limites

A primeira abordagem estudada admite utilizar as funções-modelo obtidas da linearização da curva experimental para limitar a posição do carretel

dentro do intervalo linear de operação da válvula, admitindo certa tolerância para as funções-modelo de subida e descida. Esta tolerância pode ser definida, por exemplo, segundo o erro absoluto máximo, isto é, a máxima distância entre as funções-modelo e a curva experimental, ou ainda usando como base o desvio padrão dos pontos x_v de um conjunto de curvas experimentais.

Neste projeto, calculou-se a distância (erro absoluto) entre os pontos de posição do carretel obtidos da curva experimental e os das funções-modelo lineares de subida e descida. Para o instante onde a diferença observada foi máxima, definiu-se experimentalmente uma tolerância de posição, a qual foi multiplicada como um fator a essa distância máxima. O resultado obtido foi então adicionado às funções-modelo (x_{vlin_s} e x_{vlin_d}), definindo funções-limite de subida (inferior) e descida (superior). O procedimento é sumarizado a seguir:

Para cada segmento da curva experimental de subida e descida:

1. Encontra-se a máxima distância dada pela equação (5) entre os pontos da curva experimental x_v e os pontos x_{vlin_i} da função-modelo linear de subida e descida, tais que $i = s$ ou d (subida ou descida);

$$d_{max_i} = \max |x_v - x_{vlin_i}| \quad (5)$$

2. Com base no valor obtido em (5) e ensaios de teste, adiciona-se certa tolerância Δe_i à distância máxima obtida, resultando em um limiar de tolerância;

$$e_{tol_i} = d_{max_i} \cdot (\Delta e_i) \quad (6)$$

3. Adicionam-se os valores obtidos de (6) à posição do carretel das funções lineares de subida e descida;

$$x_{vtol_s} = x_{vlin_s} - e_{tol_s} \quad (7)$$

$$x_{vtol_d} = x_{vlin_d} + e_{tol_d} \quad (8)$$

4. Finalmente, ajustam-se os pontos obtidos de (7) e (8) à melhor curva linear, usando um comando do software Matlab, obtendo-se funções-limite superior e inferior representadas pelas equações (9) e (10) abaixo.

$$x_{vlim_s} = a_{lim_s}U_c + b_{lim_s} \quad (9)$$

$$x_{vlim_d} = a_{lim_d}U_c + b_{lim_d} \quad (10)$$

Deste modo, foram obtidas funções-limite dinâmicas para os segmentos de subida e descida do carretel, com o objetivo de representarem limiares para a detecção de falhas. Observa-se na Figura 5.5, a representação gráfica destas funções junto da curva da Figura 5.4. Assim, caso o valor lido pelo sensor de posição da válvula ultrapassar as funções-limite inferior ou superior, haverá um indicativo de anomalia no dispositivo. O resultado gráfico da dinâmica do método quando um sinal de comando senoidal é aplicado à válvula é apresentado na Figura 5.6.

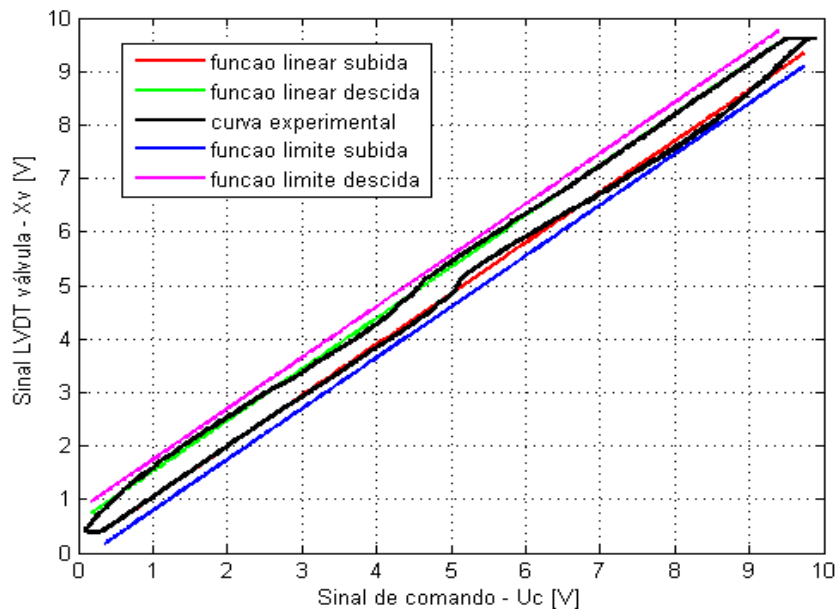


Figura 5.5 – Funções-limite de subida e descida da curva característica da válvula.

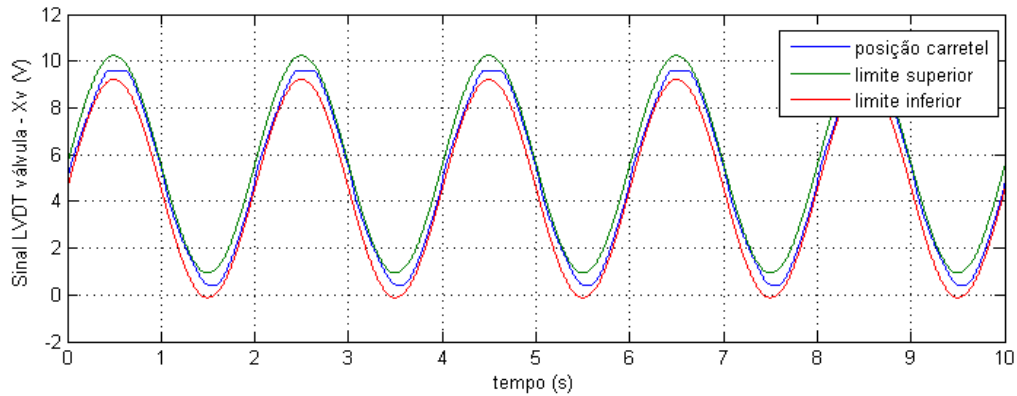


Figura 5.6 – Comportamento das funções-limite quando da aplicação de um sinal senoidal de comando.

O atraso de transporte observado no sinal de leitura da posição do carretel é característico do tempo de resposta da válvula que, para a válvula utilizada neste trabalho, é em torno de 15 ms sendo um fator importante a ser considerado quando da determinação do valor de tolerância da equação (6) para determinação das funções-limite dinâmicas.

5.3.2: Detecção de mudanças abruptas

A escolha de uma segunda abordagem para detecção de falhas se justifica ao tentar-se melhorar a robustez do sistema de monitoramento, admitindo que aconteçam situações que não estão de acordo com o comportamento correto de funcionamento da válvula entre os limites de operação impostos pelo método anterior. A opção por uma técnica que usasse ferramentas estatísticas capazes de detectar desvios de comportamento nos sinais de erro (entre curva experimental e funções-modelo) observados em tempo real foi motivada pela grande quantidade de trabalhos que apresentaram bons resultados na detecção de falhas abruptas das mais variadas amplitudes em sistemas reais, como em [11] e [18], e por sua simplicidade de construção e operação *on-line* em conjunto com outros métodos. O desafio está, entretanto, em desenvolver um algoritmo que seja robusto em detectar anomalias resultantes de perturbações e do mau funcionamento da válvula, e ao mesmo

tempo não tão sensível a ruídos e desvios eventualmente presentes nos sinais de resíduos.

Algoritmo de Detecção por Teste de Hipóteses

O algoritmo para detecção de desvios implementado neste trabalho utiliza, para cada amostra do sinal de resíduo, a soma cumulativa (11) de uma função estatística denominada razão de log-verossimilhança (*log-likelihood ratio*) (12) entre funções densidade de probabilidade de uma sequência de um total N de amostras do resíduo r , e é provada em [3] ser estatística suficiente para fazer inferência sobre um determinado parâmetro θ de r , dado um teste entre duas hipóteses H_0 e H_1 dadas por (13).

$$S_i = \sum_j^k s_i \quad (11)$$

$$s = \ln \frac{p(r|H_1)}{p(r|H_0)} \quad (12)$$

$$\begin{cases} H_0: \theta = \theta_0 \\ H_1: \theta = \theta_1 \end{cases} \quad (13)$$

Onde $p(r|H_{0 \text{ ou } 1})$ é a probabilidade de observar r dado que $H_{0 \text{ ou } 1}$ é verdadeira.

Para cada amostra r_i (com $i = 1, 2, \dots, N$) o teste de hipóteses (13) é realizado. Enquanto a decisão for tomada em favor de H_0 , a soma (11) continua sobre a próxima amostra, bem como o teste de hipóteses. Na primeira amostra para a qual o teste resultar a favor de H_1 , uma decisão sobre o comportamento do sinal é tomada, e a soma acumulada é atualizada a zero para recomeçar na próxima amostra.

Sabendo-se que falhas aditivas provocam alterações abruptas na média μ do sinal de resíduo [11], escolhe-se $\theta = \mu$. Neste trabalho, considera-se que

o resíduo obtido apresenta uma distribuição de probabilidade gaussiana $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ com média (μ) zero e variância (σ) unitária. Para tanto este sinal deve ser normalizado a partir de (14) dividindo-o pela média e desvio padrão observados para um conjunto de dados livres de falha, quando a válvula apresenta condição saudável de operação.

$$r_{iN} = \frac{r_i - \mu}{\sigma} \quad (14)$$

Desta maneira, a função de distribuição de probabilidade do resíduo $p(r_{iN})$ dada determinada hipótese H_0 ou 1 é gaussiana e dada por:

$$p(r_{iN} | H_0 \text{ ou } 1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r_{iN} - \mu_0 \text{ ou } 1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

Substituindo-se a equação (15) em (12), esta fica:

$$s_i = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \left(r_{iN} - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2} \right) \quad (16)$$

sendo $\mu_0 = 0$. Arranjando-se a equação (11) na sua forma recursiva, tem-se:

$$S_i = S_{i-1} + s_i \quad (17)$$

com $s_0 = 0$. Chama-se ainda

$$v = \mu_1 - \mu_0 \quad (18)$$

de magnitude da mudança na média a qual se deseja detectar. A regra de parada do algoritmo e consequente decisão por uma hipótese no teste estatístico é dada por:

$$R_p = \begin{cases} H_0, & \text{se } S_i \leq B \\ S_{i-1} + s_i, & \text{se } B < S_i < A \\ H_1, & \text{se } S_i \geq A \end{cases} \quad (19)$$

Onde os limiares A e B estão relacionados com as probabilidades de acontecer erros do tipo I (α), ou *falso alarme*, isto é, a chance do teste rejeitar H_0 , quando esta hipótese de fato ocorreu, e erro do tipo II (β), ou *alarme perdido*, que indica a chance do teste rejeitar H_1 , dado que esta situação ocorreu, sendo $(\alpha, \beta) \in [0,1]$. Mais detalhes podem ser encontrados em [17]. Segundo [9], os limites A e B são dados por:

$$A = \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right) \quad (20)$$

$$B = \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) \quad (21)$$

Portanto, se houver um desvio v na média μ_0 do resíduo r_{iN} , o sinal de S_i , tende a se afastar de s_0 , com a mesma direção de v , segundo equação (16). A evolução de S_i nesta situação, e sua relação com os limites A e B é apresentada na Figura 5.7.

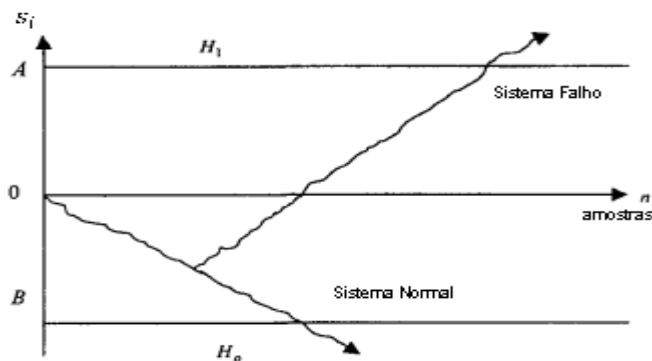


Figura 5.7 – Trajetória do sinal S_i em caso de uma mudança na média do sinal de resíduo.

Caso este desvio levar S_i a ultrapassar o limite superior A , H_1 é aceita, atualiza-se S_i para s_0 , e a saída do algoritmo apresenta o sinal $d_p = 1$, indicando que uma anomalia na média do sinal ocorreu e, para este trabalho, que o sistema apresenta estado de falha. Caso o sinal permaneça entre os limites impostos, continuando a soma de S_i , ou ultrapasse o limite inferior B , aceitando H_0 , mas atualizando S_i para s_0 , o sistema é considerado apresentar estado normal de operação, e a saída do algoritmo apresenta resposta nula com o sinal $d_p = 0$. Em resumo, a saída do algoritmo de detecção é tal que:

$$d_p = \begin{cases} 0, & \text{se } S_i < A \\ 1, & \text{se } S_i \geq A \end{cases} \quad (22)$$

Resumindo, adotados os valores de v , A e B , o algoritmo de detecção é executado sob os seguintes passos, para cada amostra do resíduo r_i :

1. Normalização do sinal r_i segundo equação (14);
2. Cálculo da razão de *log-verossimilhança* dada pela equação (16);
3. Cálculo da soma cumulativa de (17): $S_i = S_{i-1} + s_i$;
4. Aplicação da regra de parada R_p , dada pela equação (19);
5. Verifica-se o valor da regra de decisão (22) e apresenta-se o resultado como saída do algoritmo.

A seguir são apresentadas algumas considerações a serem tomadas quando da parametrização do algoritmo apresentado nesta seção.

- Deve-se admitir a possibilidade de ocorrência de mudanças na média do sinal de resíduo tanto positivas como negativas, isto é:

$$\mu_1 = \mu_0 \pm v \quad (23)$$

Para detectá-las em ambos os sentidos, se faz necessário usar dois algoritmos de detecção em paralelo. Para tanto, basta substituir a equação (23) em (16), atualizando o passo 3 da execução do algoritmo;

- É necessário saber-se de antemão a magnitude de mudança da média, apresentada pela equação (18) como v . Na prática, pouco é sabido sobre este valor, fazendo com que este seja obtido por tentativa e erro. Neste sentido, três possibilidades de escolha a priori podem ser feitas:
 - a) Escolher o *menor possível* valor para a magnitude do salto v ;
 - b) Escolher o *mais provável* valor para a magnitude do salto v ;
 - c) Escolher o valor de *pior caso* no sentido do *custo* de um salto v não detectado.

Destas três possibilidades, o único valor que faz o resultado do algoritmo ser *ótimo* é a escolha da magnitude igual a v . Ainda, segundo [9], este valor pode ser determinado aplicando-se o algoritmo de detecção a um conjunto de dados livres de falhas, localizando o valor de v que mais se aproxime do valor adotado para a probabilidade de falsos alarmes α .

- Tendo em vista que uma determinada detecção pode ser considerada insignificante em relação a outras ocorridas, gerando assim um alarme desnecessário e, para aumentar a confiabilidade dos resultados do algoritmo de detecção, pode-se decidir por H_1 somente quando um valor mínimo de ultrapassagens (*crossings*) do limite superior “A” ocorrer sobre amostras sucessivas. Para tanto, basta elaborar um contador após o passo 4 do algoritmo, atribuindo-o mais uma variável. Obviamente, este valor também depende da sensibilidade que se deseja para os resultados de detecção. O valor pode variar segundo cada condição de falha analisada.

- Deve-se haver algum compromisso para a escolha dos valores de α e β , considerando que a soma acumulada é atualizada a zero quando uma hipótese é aceita. Por exemplo, para dado α , se dobrarmos o valor de β , o valor inferior “B” aumenta em uma escala muito maior do que o valor superior “A” diminui, aumentando, assim, a chance de aceitar-se pela hipótese H_0 e desperceber-se situações de falha.

Abaixo segue um exemplo da resposta do algoritmo quando o resíduo apresenta determinados desvios.

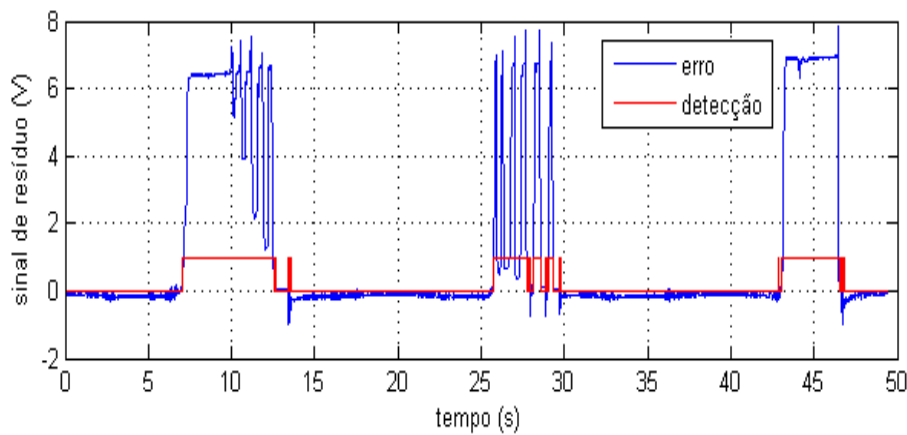


Figura 5.8 – Exemplo da aplicação do algoritmo sobre um resíduo sob simulação de desvios.

5.4: Visão geral do sistema de monitoramento

Nesta seção é mostrada por meio da Figura 5.9 a visão geral em um esboço por diagrama de blocos do sistema de detecção e monitoramento implementado neste trabalho, cuja metodologia foi explanada neste capítulo, considerando-se a válvula atuando em malha fechada de posição do atuador, como será visto nos ensaios de validação no capítulo 8.

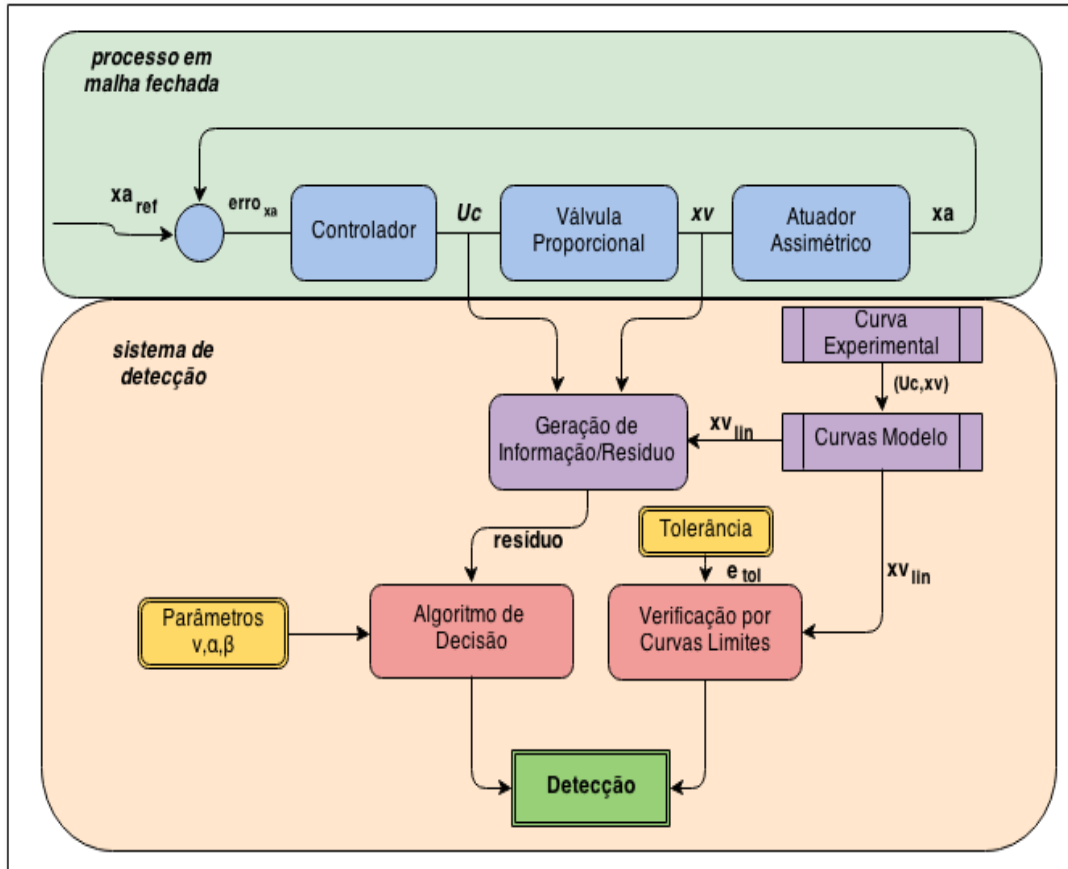


Figura 5.9 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de monitoramento on-line.

Onde:

- $x_{a_{ref}}$: posição do atuador de referência para a malha fechada;
- x_a : posição do atuador medida;
- $erro_{xa}$: erro de posicionamento do atuador;
- (U_c, x_v) : sinal de controle (comando) para a válvula e correspondente posição do carretel;
- $x_{v_{lin}}$: funções-modelo lineares de subida e descida;
- $resíduo$: diferença entre posição do carretel observada e ;
- e_{tol} : limiar adicionado às curvas modelo para gerar as curvas limite de posição do carretel, $x_{v_{lim}}$;
- *Parâmetros* v, α, β : para inicialização do algoritmo de detecção, conforme apresentado na seção anterior.

Capítulo 6: Caracterização experimental do sistema de monitoramento de condição em laboratório

Neste capítulo são apresentados brevemente os equipamentos, circuitos hidráulicos e softwares da bancada de ensaios de Hidráulica do *LASHIP* que foram utilizados para a realização de todos os ensaios deste trabalho. Após, os ensaios realizados para caracterização experimental da válvula e parametrização do sistema de detecção são apresentados e comentados.

6.1: Bancada de ensaios

A bancada de ensaios da Hidráulica no *LASHIP* é servida por uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico (UPCH). Esta unidade é capaz de controlar vazão, pressão e temperatura, possuindo vazão máxima de 100 dm³/min, pressão máxima de 20 MPa (200 bar) e temperatura máxima de trabalho de 60°C, limitada pela temperatura de degradação do fluido hidráulico [4]. Este trabalho não utiliza todos os recursos da bancada e da UPCH, de maneira que serão apresentados no circuito hidráulico da Figura 6.1 apenas os componentes de interesse para a compreensão das funções utilizadas.

O fluido hidráulico utilizado é classificação ISO VG32, como requisitado pela norma ISO 10770-1 para o ensaio de válvulas de controle hidráulicas eletricamente moduladas de quatro vias [4].

6.1.1: Circuito hidráulico

O circuito hidráulico da bancada de ensaios utilizada neste trabalho é apresentado na Figura 6.1 cuja simbologia está de acordo com a norma ISO 1219-1. A Tabela 6.1 descreve os componentes que fazem parte do circuito hidráulico e que foram de interesse para este trabalho, assim como os transdutores e transmissores instalados na bancada para os ensaios.

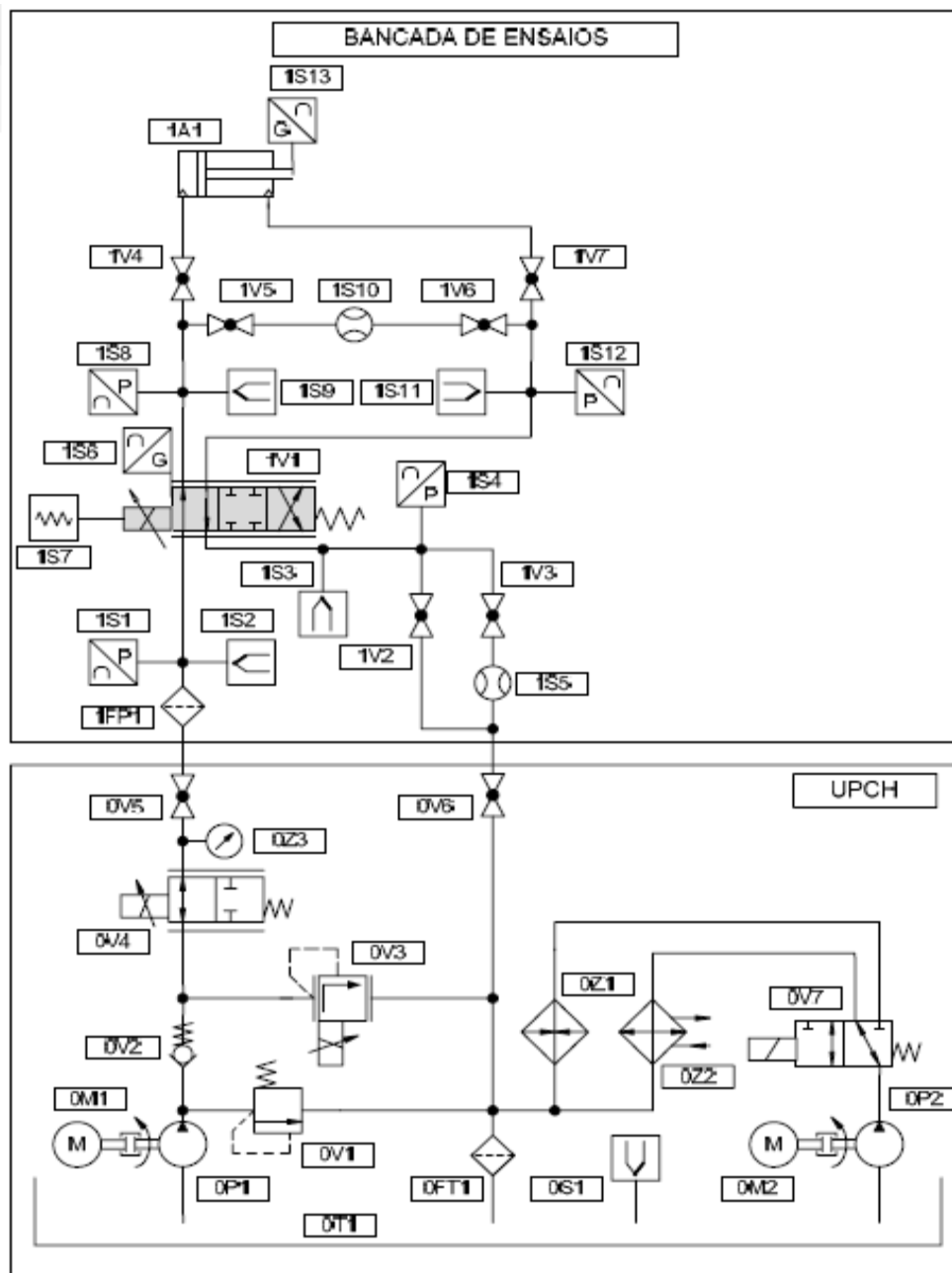


Figura 6.1 – Circuito Hidráulico da UPCH e da bancada de ensaios.

Tabela 6.1 – Componentes da bancada de ensaios e da UPCH.

Circuito Hidráulico da UPCH	
Descrição	Componente
Reservatório de 500 litros	0T1
Filtro da linha de retorno	0FT1
Motor elétrico de 30 cv	0M1
Motor elétrico	0M2
Bomba de pistão axial de eixo inclinado 30	0P1
Bomba centrífuga	0P2
Termopar tipo J do controlador de temperatura	0S1
Válvula limitadora de pressão	0V1
Válvula de retenção	0V2
Válvula limitadora de pressão proporcional	0V3
Válvula controladora de vazão proporcional	0V4
Válvula de esfera	0V5,0V6
Válvula direcional de 3 vias	0V7
Trocador de calor de aquecimento (resistências)	0Z1
Trocador de calor de refrigeração (óleo/água)	0Z2
Indicador de pressão de suprimento	0Z3
Circuito Hidráulico da Bancada de Ensaios	
Cilindro assimétrico curso 500 mm	1A1
Filtro da linha de suprimento	1FP1
Transdutor de vazão	1S10
Transmissor de Pressão	1S1, 1S4
Transdutor de Pressão	1S8,1S12
Válvula Proporcional Direcional	1V1
Válvula de Esfera	1V2,1V3,1V4,1V5,1V6,1V7

6.1.2: Aquisição de dados

A aquisição dos dados referentes às grandezas analisadas neste trabalho foi realizada por um conjunto de componentes de medição, condicionamento, e armazenamento de dados integrados à bancada de ensaios. Estes equipamentos são descritos a seguir.

1. Placa de aquisição *DSPACE*

Utilizada para a conversão de dados analógicos 0-10V e 0-5V para meio digital, assim como para a conversão de sinais digitais em sinais analógicos de 0-10V. É responsável também por gerar os sinais de comando para a válvula. Para tanto, possui um software para interface, pelo qual é possível monitorar os sinais dos transdutores da bancada em tempo real e enviar os sinais de comando desejados. Além disso, fornece uma biblioteca para integração com o software *Matlab/Simulink* sendo capaz de carregar e ler arquivos provenientes da ferramenta de tempo real desta plataforma. Assim, era permitido acesso a diversas variáveis do diagrama de blocos dos ensaios (elaborado na plataforma Simulink) podendo-se, por exemplo, associar essas informações às portas de entrada e saída da placa de aquisição.

2. Condicionadores de sinais ISO01 e ISO02

Fabricados pela *Reivax*, estes condicionadores tem a função de entregar à válvula o sinal apropriado de corrente (4-20 mA), dado que a placa de aquisição fornece e recebe sinais apenas na escala de 0-10V. De maneira similar, deve transformar os sinais de corrente provenientes do LVDT para a escala de tensão apropriada à aquisição, e para tanto são usados dois ISOs. A Figura 6.2 ilustra o uso dos condicionadores. O número 01 ou 02 corresponde apenas à geração de fabricação destes dispositivos pela empresa.



Figura 6.2 – Condicionamento de sinais Válvula/Placa através dos ISOs.

3. Fonte AC/DC 24V

Foram utilizadas duas fontes 24V. Uma fonte digital que alimentava os dois ISOs, e outra analógica para suprir todos os transdutores, além da válvula proporcional.

4. Software

Para condicionamento, armazenamento e apresentação de dados fornecidos pelos transdutores da bancada de ensaios e do sistema de monitoramento de condição implementado neste trabalho, assim como para a geração de sinais de comando, foram utilizados softwares do pacote do Matlab 7.2. A integração entre estes e os componentes físicos da bancada de ensaios é mostrada na Figura 6.3. Uma breve descrição da função realizada em cada software é dada a seguir.

- **Matlab 7.2**

Utilizado para a realização de operações com matrizes de dados, geração de gráficos e armazenamento dos dados dos ensaios em arquivos. Recebe estes dados do diagrama de blocos elaborados na plataforma Simulink como mostrado na Figura 6.4. O Matlab também é utilizado para definir as variáveis utilizadas nestes diagramas de blocos.

- **Simulink 6.5**

Utilizado para a construção do diagrama de blocos dos ensaios, além da geração, amplificação, filtragem e correção de sinais da bancada de ensaios. Através da ferramenta *Real-Time Workshop*, é capaz de compilar, por meio de uma biblioteca (.dll) de integração entre softwares *Dspace - Matlab/Simulink*, seus arquivos em formato “.mdl” contendo todas as informações do diagrama de blocos (variáveis, conexões, etc.), além das variáveis contidas no *workspace do Matlab*, em um formato “.sdf”, o qual pode ser lido pelo software de interface *ControlDesk* da placa de aquisição. O diagrama de blocos elaborado para os ensaios pode ser visto na Figura 6.4, onde o bloco em azul

corresponde ao sistema de monitoramento, a ser detalhado na seção 6.3 deste capítulo.

- **ControlDesk**

É o software de interface para comunicação entre Simulink e placa Dspace, pelo qual se pode ter acesso aos transdutores conectados às entradas da placa e ao arquivo gerado pela ferramenta *Real-Time Workshop* do *Simulink*, contendo as informações do diagrama de blocos elaborado. Assim, é possível associar as variáveis criadas no diagrama *Simulink* aos transdutores da bancada e, através da manipulação de gráficos, monitorá-las em tempo real. Além disso, pode-se também controlar o tempo de aquisição (do ensaio), o tipo de sinal de entrada (que a válvula vai receber), e salvar os dados em diversos formatos (.txt, .xls, .mat, entre outros). A Figura 6.5 ilustra o uso desta interface.

6.1.3: Válvula direcional proporcional ATOS

A válvula ATOS modelo *DHZ0-TE-071-L5-I* é uma válvula de controle contínuo direcional acionada por dois solenóides proporcionais de acordo com um sinal elétrico de comando. Possui eletrônica embarcada, que deve ser alimentada por uma fonte a 24V, podendo fornecer corrente de comando ao solenóide em um intervalo padrão de 4 a 20 mA. Seu carretel apresenta sobreposição positiva e vazão máxima de aproximadamente 50 L/min (litros por minuto) a uma diferença de pressão total nas vias (Δp) de 30 bar. Uma malha interna fechada de posição do carretel é usada para garantir que este sinal, lido pelo sensor *LVDT* acoplado à válvula, seja correspondente ao sinal de comando enviado. Esta válvula foi fornecida pela *Reivax* ao projeto, cujo modelo, mostrado na Figura 4.12, é o mesmo que os utilizados em seus reguladores de velocidade. Mais informações podem ser encontradas em [2].

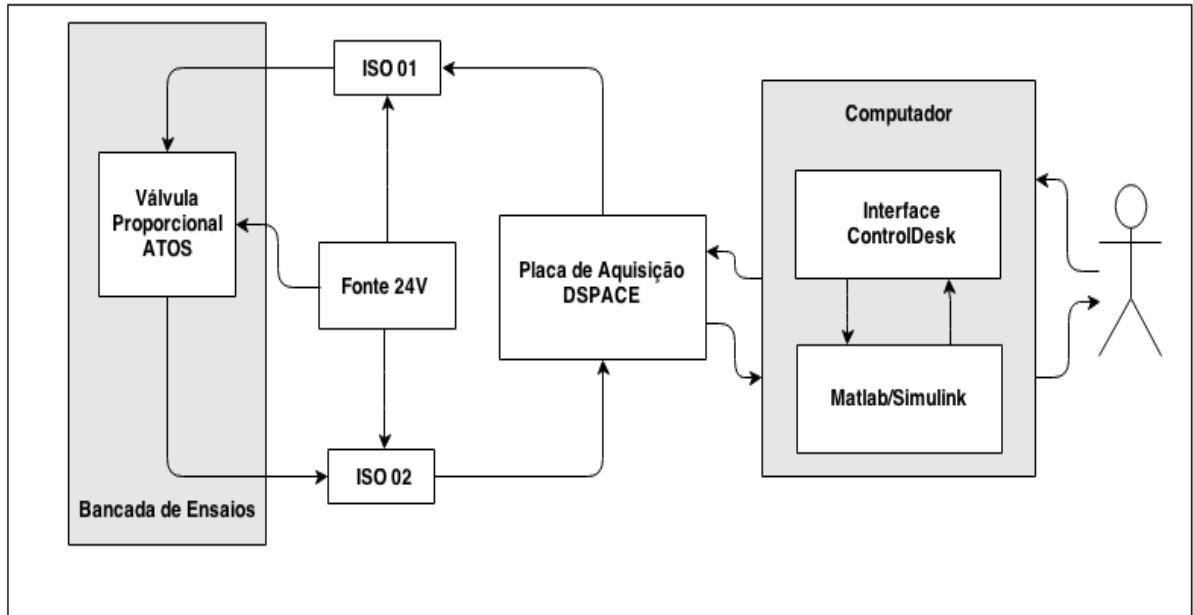


Figura 6.3 – Integração e fluxo de informação entre software e hardware da bancada de ensaios.

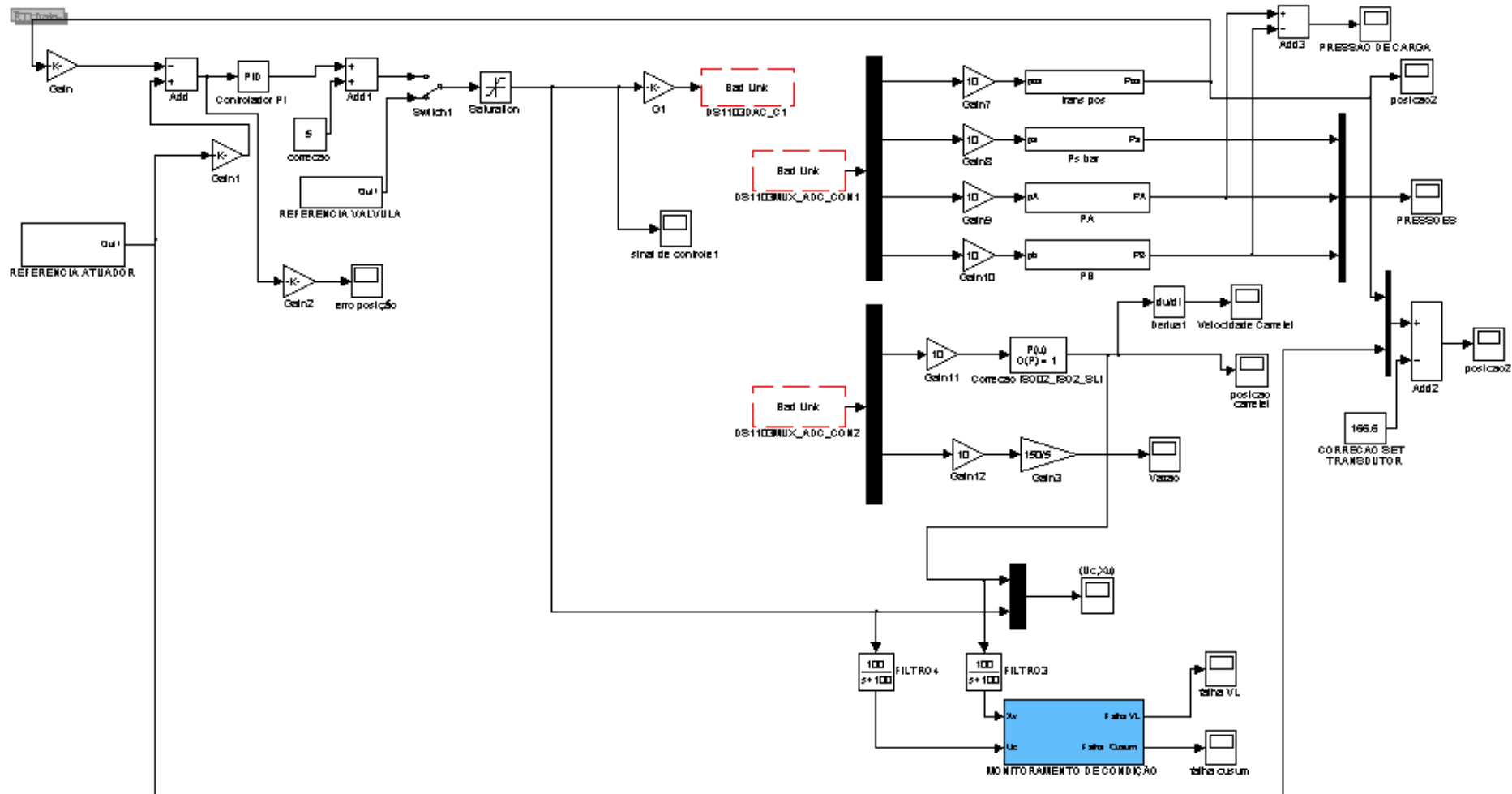


Figura 6.4 - Diagrama de Blocos do Projeto em Simulink.

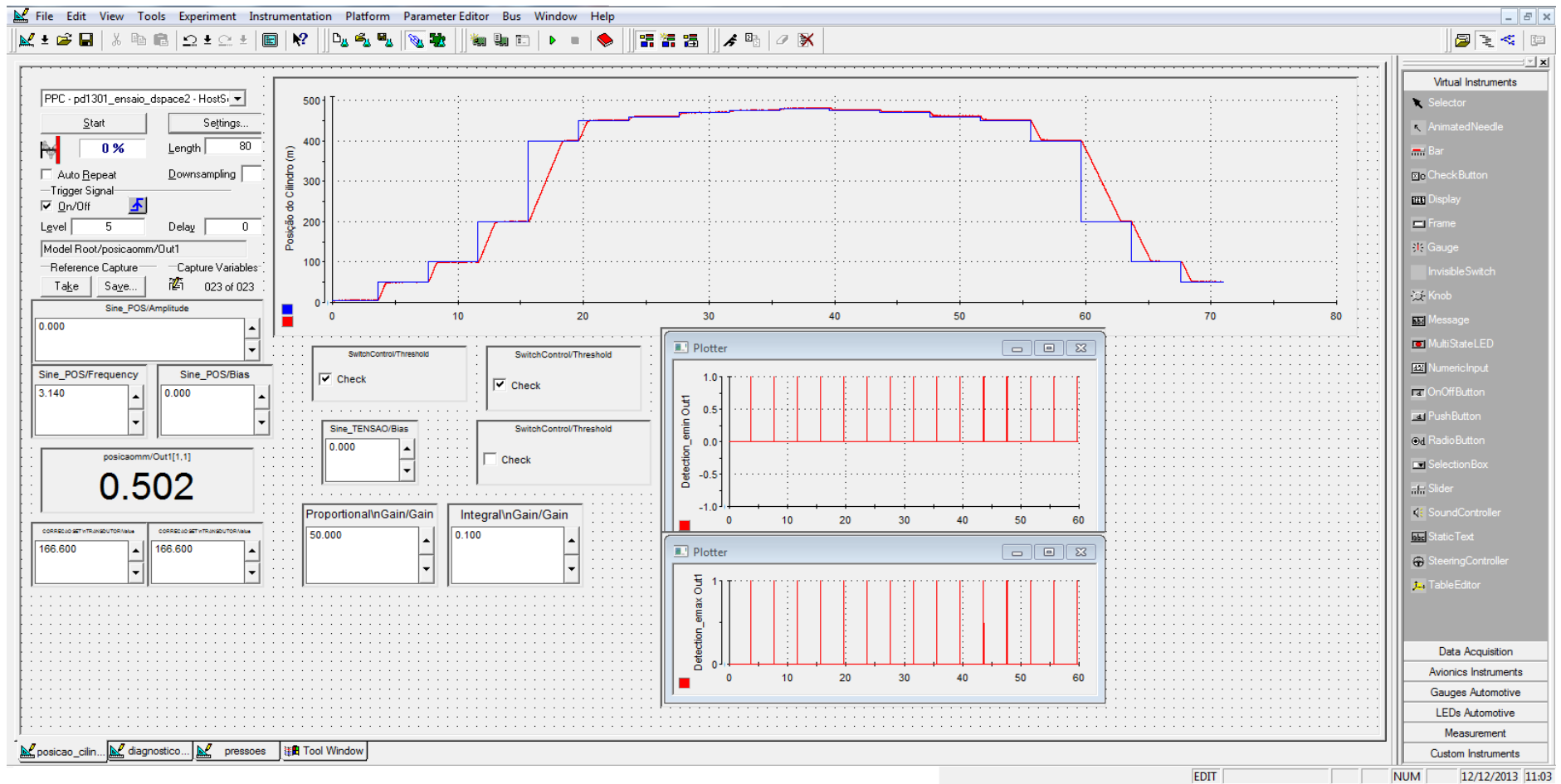


Figura 6.5 – Interface ControlDesk de comunicação Simulink/Placa de aquisição Dspace.

6.2: Ensaios de caracterização experimental da válvula

Nesta seção são descritos os ensaios realizados para levantar a curva experimental característica da válvula, a partir da medição de sinais de entrada (U_c) e saída (x_v) correspondentes à posição do carretel da válvula. Estes ensaios foram realizados considerando-se que a válvula apresentava boas condições de operação, isto é, sem falhas. A curva característica levantada foi avaliada quanto ao seu comportamento nos intervalos de subida e descida sob variação de determinadas grandezas conforme exposto na seção 5.2. Para a descrição da alteração dos circuitos hidráulicos foi usada a simbologia da Tabela 6.1.

Durante os primeiros ensaios, observou-se certa incoerência no sinal fornecido pelo transdutor LVDT da válvula, o qual fornecia um valor maior do que o comandado, mesmo com a malha fechada de posição do carretel da válvula. Como a placa de aquisição saturava os sinais recebidos superiores a 10V, um ajuste foi realizado através de um polinômio de correção para os sinais vindos do condicionador ISO02. Observando-se que para sinais de comando superiores a aproximadamente 9.6V já acontecia saturação do sinal recebido e, portanto, os dados acima desse valor, perdidos, a válvula foi ajustada a operação de 0.1-9.6V, com erro de medição observado de até 0.030V. Todos os dados foram registrados a uma taxa de amostragem de 1 ms.

6.2.1: Sinal de comando versus posição do carretel (U_c x x_v) a uma queda de pressão Δp na válvula

Considerando-se as variáveis que alteram a queda de pressão Δp na válvula como sendo a pressão de suprimento p_s e a pressão de carga p_c entre as vias A e B da válvula apresentada na Figura 4.1, o comportamento da curva entrada-saída (U_c x x_v) é avaliado sob o efeito dessas grandezas.

6.2.1.1: Para dada faixa de pressão de suprimento p_s

Neste ensaio foi controlada a queda de pressão através da pressão de suprimento p_s . Sem atuador e ligando a via A da válvula à via B, praticamente não há pressão de carga, e a queda de pressão na válvula é semelhante a p_s . Para tanto, os ensaios foram realizados a uma temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$, com as válvulas 1V4 e 1V7 fechadas enquanto as válvulas 1V2, 1V5 e 1V6 permaneceram abertas. Um sinal de comando senoidal com offset 5V, amplitude 4.9 V (evitando saturação deste sinal pela placa de aquisição) e período de 2 segundos foi aplicado durante 5 ciclos, e a posição do carretel foi registrada para as faixas de p_s de 30, 60, 90, 120 e 150 bar. O resultado é mostrado na Figura 6.6.

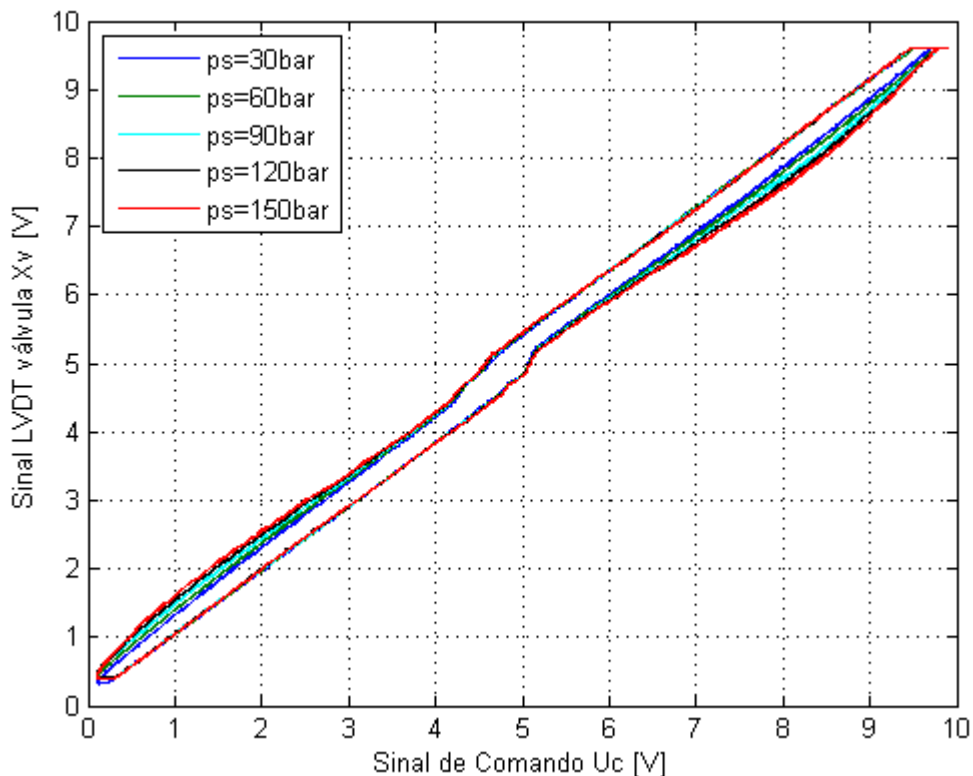


Figura 6.6 - Curva $U_c \times x_v$ a múltiplas faixas de p_s .

A posição do carretel variou numa faixa de 0.1V a 9.6V, como esperado, dada correção aplicada para o sinal de saída do ISO02. Observa-se que a faixa

aproximadamente linear se manteve, com variação máxima de x_v entre as curvas (30 e 150 bar), para um mesmo sinal de comando, de aproximadamente 0.3V.

6.2.1.2: Para dada pressão de carga p_c

Este ensaio foi realizado a uma temperatura de $40\pm 2^\circ\text{C}$ e a uma pressão de suprimento p_s constante de 120 bar. Novamente, as vias A e B da válvula foram ligadas, pela abertura das válvulas 1V6 e 1V2, e fechamento das válvulas 1V4, 1V7 e 1V3. O objetivo era verificar se, alterando a pressão de carga, isto é, a diferença de pressão entre as vias A e B da válvula, modificava-se a característica comportamental da posição do carretel quando aplicado um sinal de referência. Sabe-se que a pressão de carga varia com a posição do carretel, e tem sinal negativo caso este esteja à esquerda do centro da válvula, quando $P_B > P_A$. Foi aplicado então, manual e pontualmente, sinais de comando, cobrindo toda a faixa de operação da válvula, com um intervalo de 1V entre cada sinal, e ajustada a pressão de carga (em módulo) manualmente pela válvula 1V5 mantendo-a em um mesmo valor. Isso foi feito para as pressões de carga de 20, 50 e 100 bar. Os resultados são apresentados na Figura 6.7 abaixo.

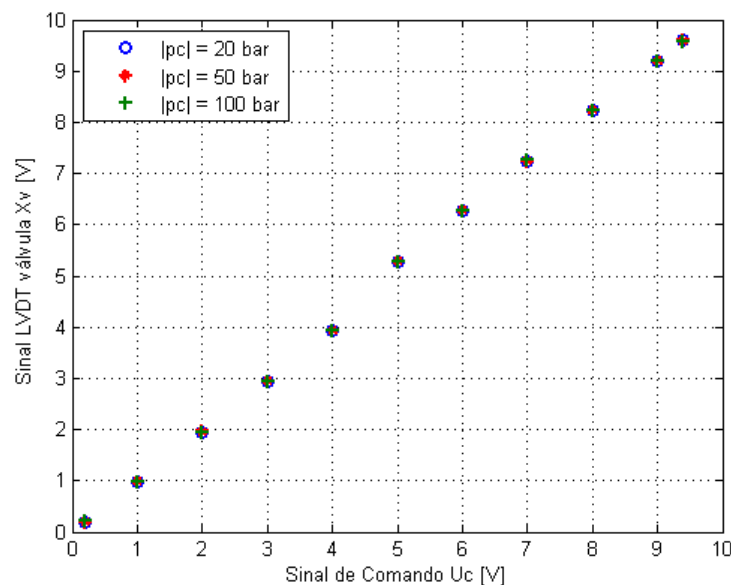


Figura 6.7 – Comportamento $U_c \times x_v$ para diferentes pressões de carga.

Deste ensaio, verifica-se que a resposta de posição do carretel da válvula, para determinada referência de comando, não se altera significativamente para mudanças na pressão de carga, mantendo a característica aproximadamente linear da curva ($U_c \times x_v$), nos intervalos de subida e descida.

6.2.2: Sinal de comando versus posição do carretel ($U_c \times x_v$) variando a frequência do sinal de comando U_c .

Este ensaio foi realizado sob as mesmas condições do ensaio da seção 6.2.1.1, mas mantendo-se p_s a 60 bar e variando a frequência da senóide de comando. O objetivo era avaliar a importância das forças de atrito viscoso (devido mudança de velocidade de carretel) no comportamento da válvula.

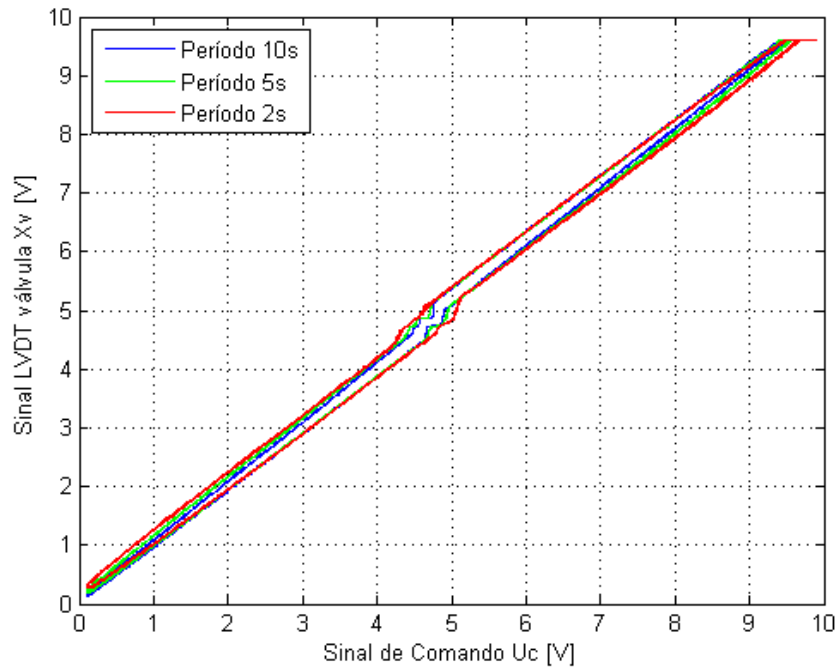


Figura 6.8 - $U_c \times x_v$ com p_s a 60 bar e temperatura de 40 °C para diferentes frequências de comando senoidal.

Pode-se verificar que a variação da frequência do sinal de entrada pouco afeta o comportamento da válvula, e que as forças de atrito que atuam

no carretel são mais significativas quanto menor sua velocidade, principalmente na região central da válvula (aproximadamente 5V).

6.2.3: Sinal de comando versus posição do carretel para diferentes faixas de temperatura

Este ensaio repete todas as condições do ensaio da seção anterior, mas mantendo-se a frequência do sinal de comando a 0.5 Hz. A curva característica da válvula foi levantada para diferentes faixas de temperatura do fluido: 23°C (temperatura quando a UPCH está em repouso por muito tempo), 30°C e 41°C. Os resultados são apresentados na figura 6.9 abaixo.

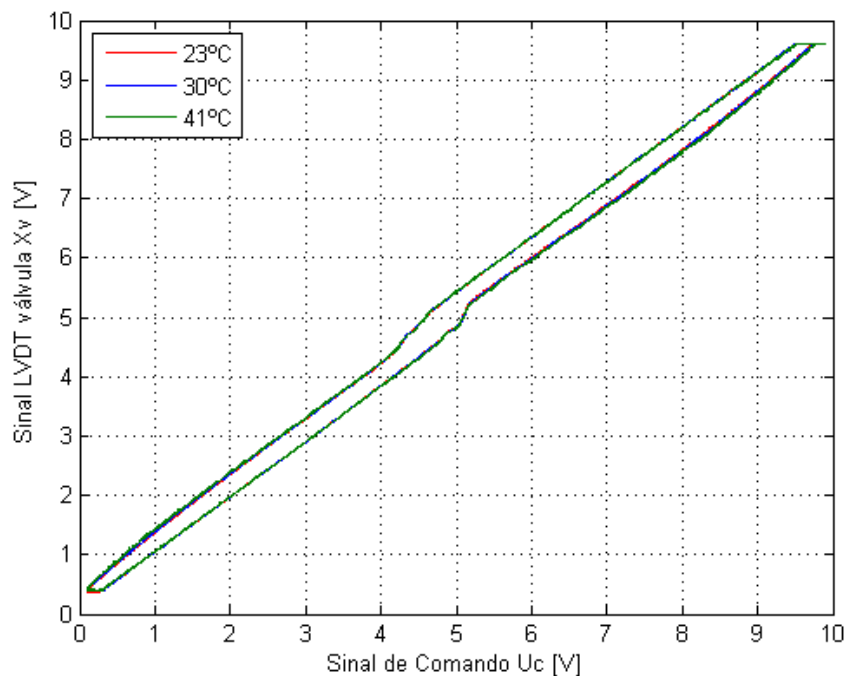


Figura 6.9 - $U_c \times x_v$ com sinal de comando a 0.5 Hz para diferentes faixas de temperatura.

Conforme já era esperado segundo trabalhos realizados por [4], a temperatura do fluido pouco influi nas forças de escoamento dentro da válvula e na relação entre sinal de comando e posição do carretel. Porém, ainda enfatizando [4], seu monitoramento não deixa de ser importante na bancada de ensaios, tendo em vista a proteção do fluido hidráulico, que tem sua vida útil

drasticamente reduzida com o aumento da temperatura de operação, podendo no futuro gerar problemas para o sistema como um todo.

6.3: Parametrização do sistema de monitoramento

Nesta seção a parametrização do sistema de detecção e monitoramento da posição do carretel da válvula é apresentada bem como sua implementação em diagrama de blocos no software Simulink, embarcando com o diagrama de ensaios já existente.

6.3.1: Geração das funções-modelo lineares

Para obtenção das curvas que servirão de modelo para o sistema de detecção foi seguida a metodologia da seção 5.2, isto é, primeiramente foi determinada a faixa de operação de deslocamento aproximadamente linear do carretel, a partir da curva mais externa (p_s a 150 bar) da Figura 6.6.

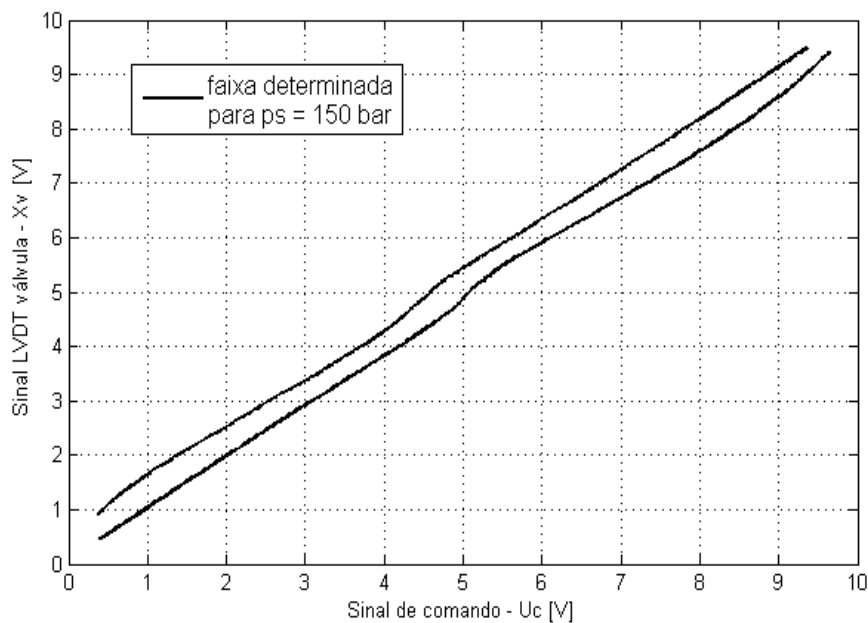


Figura 6.10 - Intervalos determinados lineares de operação na curva característica da válvula para uma p_s de 150 bar.

Depois, para linearizar os pontos (U_c, x_v) desta faixa foi aplicado o comando *polyfit()* do Matlab, ajustando-os a melhor curva de primeira ordem. Desta maneira foram obtidos os coeficientes a_i e b_i para as funções modelo de subida e de descida ($x_{vlin_i} = a_i U_c + b_i$) da curva, tais que:

$$a_s = 0,9535, b_s = 0,076, a_d = 0,9501 \text{ e } b_d = 0,6173$$

A representação das funções modelo junto às curvas obtidas da Figura 6.6, é apresentada abaixo.

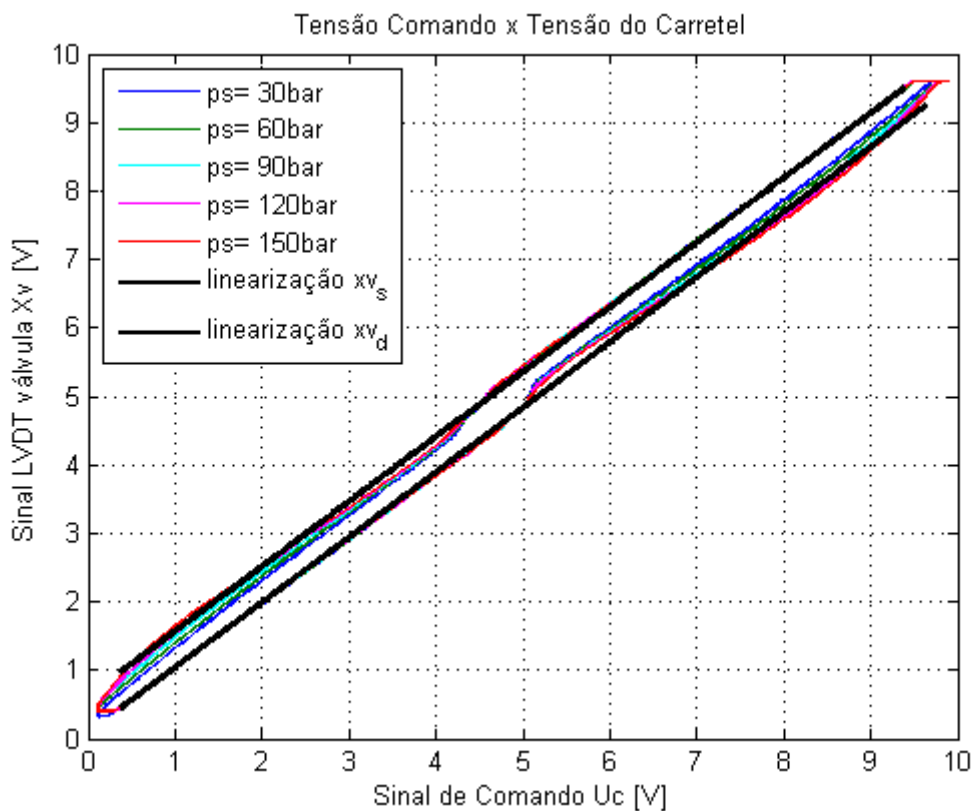


Figura 6.11 – Curvas modelo lineares junto às curvas experimentais para uma faixa de quedas de pressão.

6.3.2: Obtenção das funções de limite dinâmico

Seguindo o procedimento apresentado na seção 5.3.1, os valores encontrados para a distância máxima d_i , bem como os coeficientes das curvas

limites superior e inferior x_{vlim_i} , a_{lim_i} e b_{lim_i} são apresentados na Tabela 6.2. Estes valores foram definidos experimentalmente a partir de ensaios em malha fechada da posição do atuador, com sinais de referência do tipo degrau e senoidal, suficientes para cobrir toda faixa de operação da válvula, de modo que a saída do sistema acusasse o mínimo de detecções possível, considerando o atraso de resposta da válvula.

Tabela 6.2 – Parâmetros encontrados para definição das curvas limite

	x_{vlim_s}	x_{vlim_d}
d_i	0,1768	0,1880
a_{lim_i}	0,9535	0,9501
b_{lim_i}	-0,2149	0,8390

As curvas limite resultantes e a resposta de saída do método podem ser vistas na Figura 6.12, quando da aplicação de um sinal de referência senoidal e degrau, depois de alcançado o regime permanente, com pressão de suprimento ajustada a 70 bar e temperatura de $40\pm 2^\circ\text{C}$.

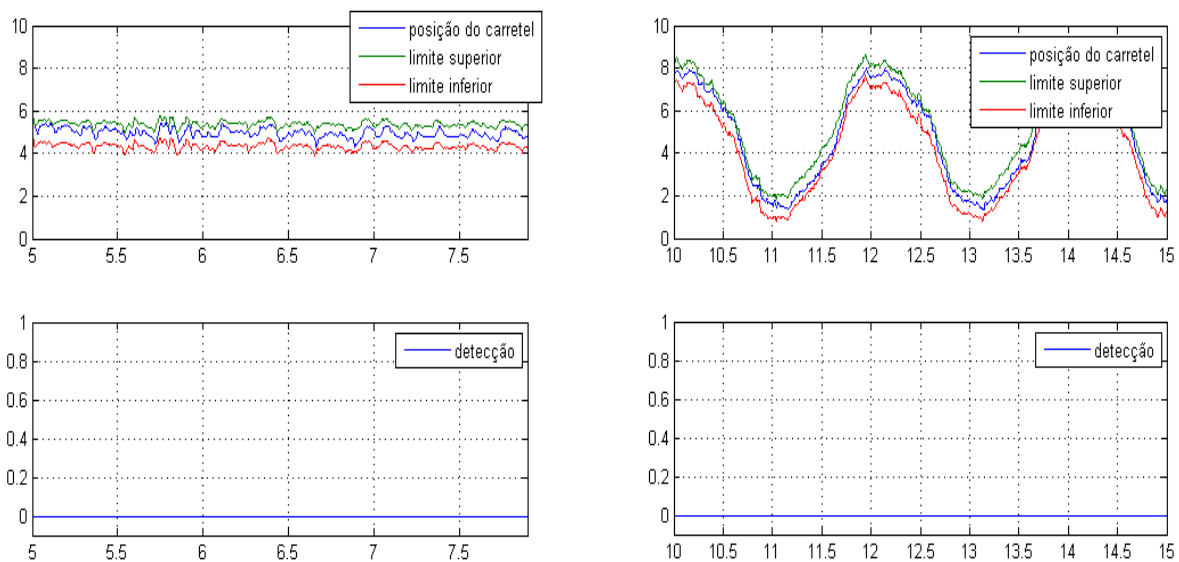


Figura 6.12 – Curvas limite e saída do sistema de detecção por verificação de limites para sinais de referência do atuador degrau e senoidal.

Observa-se que, para a referência degrau, em regime permanente, a válvula, permanece em aproximadamente 5V, que corresponde à região central da válvula, onde a passagem de fluido pelos orifícios está bloqueada, mantendo o cilindro na posição desejada.

6.3.3: Parametrização do algoritmo de detecção

Primeiramente, necessitava-se normalizar o sinal de resíduo proveniente da comparação entre a posição do carretel medida e as funções-modelo lineares, para cada intervalo de descida e subida, tendo, assim, dois sinais tais que:

$$r_{is} = x_v - x_{vlin_s} \quad (25)$$

$$r_{id} = x_v - x_{vlin_d} \quad (26)$$

Segundo a equação (14), a média e o desvio padrão destes sinais devem ser obtidos quando da válvula em operação normal. Para tanto foram realizados ensaios deixando a válvula operar em malha fechada de posição do atuador por um determinado tempo. Após tal, os dados de resíduo foram colhidos e calculados média e desvio padrão, apresentados na Tabela 6.3.

Como existem dois sinais de resíduo, fez-se necessário aplicar dois algoritmos de detecção para cada um deles, garantindo a detecção tanto para desvios negativos como positivos na média.

Tabela 6.3 – Média e desvio padrão obtidos para os sinais de resíduo

<i>Parâmetros</i>	r_{is}	r_{id}
Média (μ)	0,1576	0,1523
Desvio padrão (σ)	0,1121	0,1135

A Figura 6.13 ilustra a construção em diagrama de blocos Simulink para o sinal de resíduo r_{iS} .

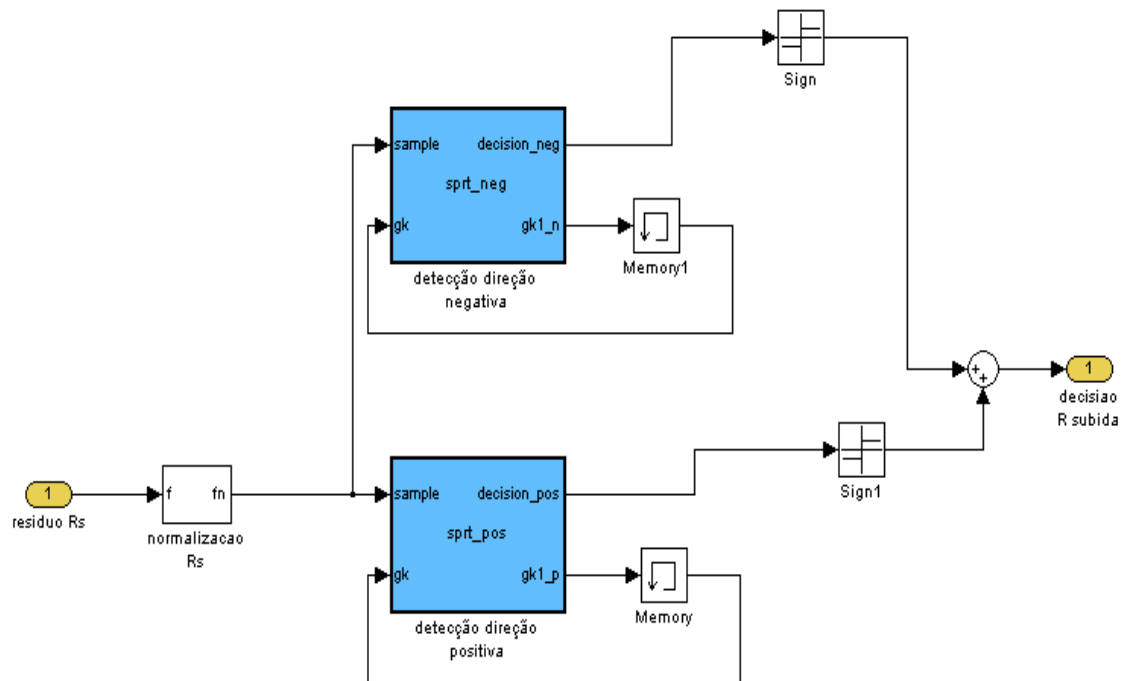


Figura 6.13 – Diagrama de blocos no Simulink do algoritmo de detecção para o resíduo, enfatizando os blocos para detecção de mudanças em ambos os sentidos.

Para a escolha do parâmetro magnitude de mudança ' v ' foram realizados ensaios em malha fechada como anteriormente, porém aplicando-se o algoritmo de detecção a esses sinais. O procedimento consistia em admitir o valor de ' v ' tal que a saída do método resultasse no menor número de falsas detecções possível.

A taxa de ocorrência de falsos alarmes ' α ' foi limitada a 15%. Este valor foi permitido ser consideravelmente alto pelos seguintes motivos:

- Primeiro porque caso o sistema não detectasse uma falha em um instante ' t ', ele provavelmente iria detectar no instante ' $t+1$ ', dado que o limite superior " A " não seria muito alto.

- Segundo porque foi creditado que, em situações reais, é menos custoso haver um falso alarme, e alertar falsas anomalias, do que deixar uma detecção e possivelmente uma falha passar despercebida, acarretando danos a longo prazo no sistema.

O valor de β foi fixado em 10%, e o número de ultrapassagens (*crossings*) permitidas no limite superior “A” foi de uma vez. A tabela 6.4 ilustra os parâmetros obtidos e a Figura 6.14 os resultados da saída do algoritmo

Tabela 6.4 – Parametrização do algoritmo de detecção

<i>Parâmetros</i>	r_{is}	r_{id}
v	0,575	0,613
<i>crossings</i>	1	1
α	0,15	0,15
β	0,10	0,10

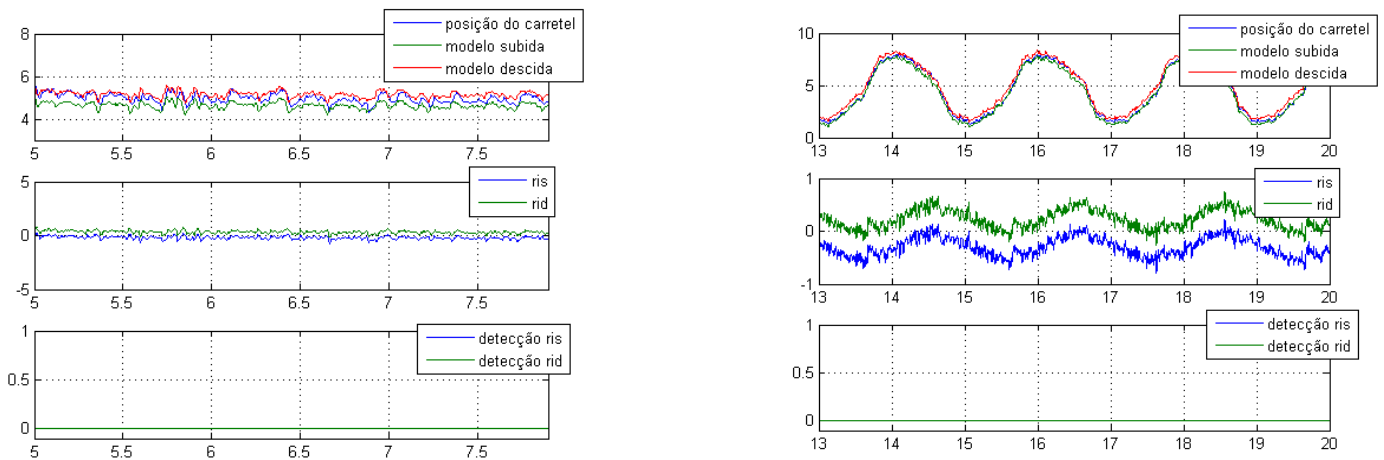


Figura 6.14 – Aplicação do algoritmo de detecção a dados de x_v livres de falhas.

6.3.4: Diagrama de blocos em simulink

A implementação final do bloco de monitoramento de condição em Simulink embarcado no arquivo de ensaios já existente, e seu conteúdo, estão apresentados nas Figuras 6.15 e 6.16.

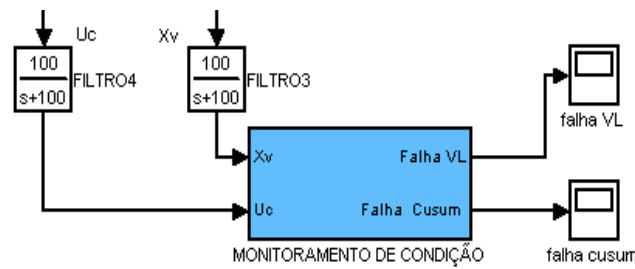


Figura 6.15 – Detalhe do bloco de monitoramento que foi acoplado a o diagrama de blocos de ensaios.

Para melhor compreensão, na Figura 6.16 colocam-se os blocos relacionados ao fluxo de informação do método verificação por limites na cor azul, e os blocos relacionados à detecção pelos algoritmos de detecção por teste de hipóteses na cor verde.

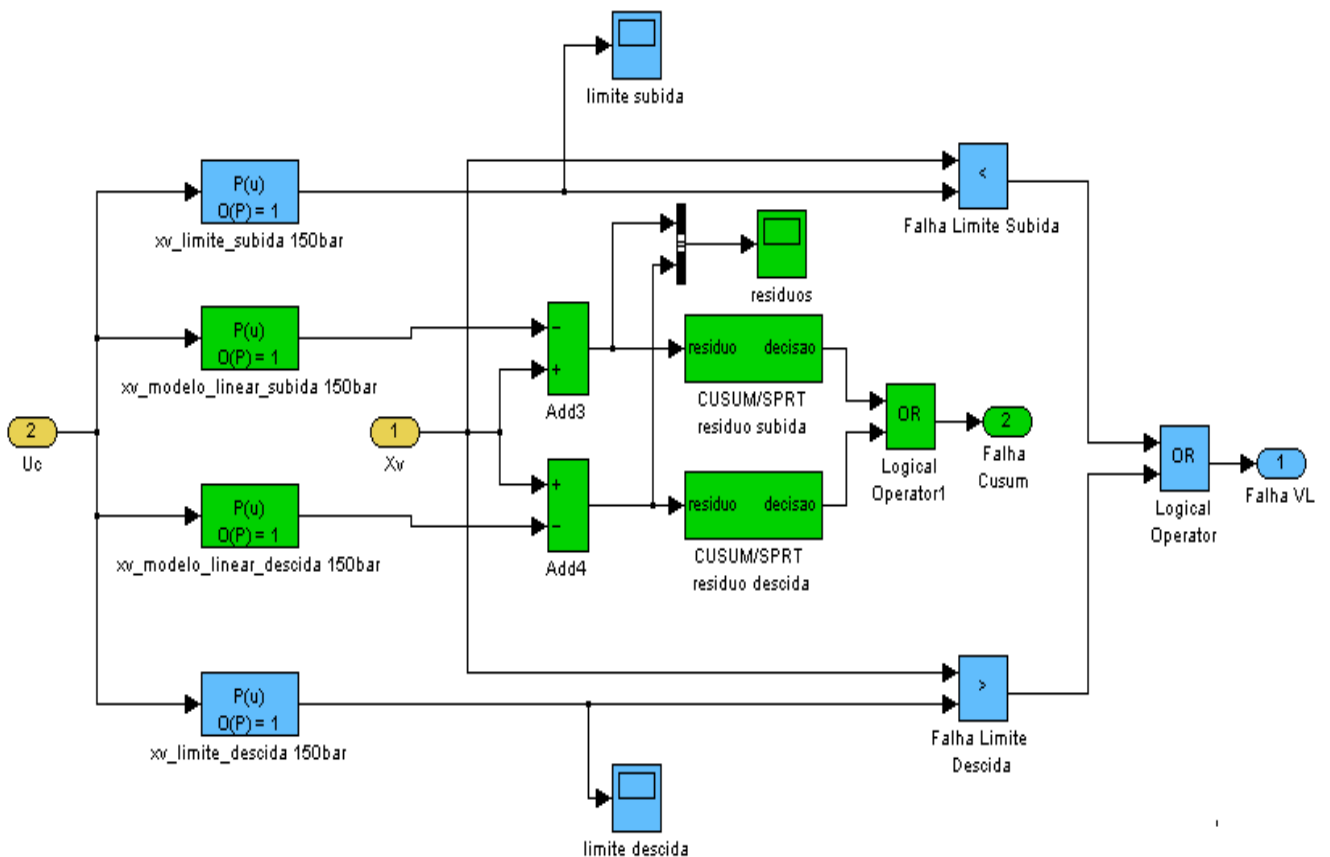


Figura 6.16 – Detalhe dos blocos dos dois métodos de detecção.

Capítulo 7: Ensaios de validação e resultados

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados para validação e comparação das técnicas utilizadas para monitoramento da condição operacional da válvula proporcional, cuja metodologia e implementação já foram discutidas neste trabalho. Para realização dos ensaios, o carretel da válvula foi sujeito a duas condições distintas: travamento e contaminação.

Todos os ensaios foram feitos com a válvula em malha fechada de posição de um atuador assimétrico, a partir do diagrama de blocos da Figura 6.4, cujo objetivo era seguir determinada referência. Para tanto, um controlador PI foi implementado de maneira tal a cumprir com essa única meta, sem se preocupar com transitório, pois a análise a ser feita aqui se limita apenas ao regime permanente. Os ganhos proporcional e integral utilizados foram 50 e 1/10 obtidos empiricamente.

Para cada condição dois tipos de sinais de seguimento de posição foram aplicados: um degrau, onde foi avaliado apenas o regime permanente, e um senoidal, com amplitude suficiente a cobrir todo deslocamento da válvula. Os sinais de posição do carretel e do atuador obtidos nos ensaios são então avaliados frente à condição normal de operação da válvula, e o desempenho de cada técnica usada para detecção das falhas discutido. Para tanto, antes de ser submetida às situações de falha, a válvula foi mantida em operação sob as mesmas condições que estaria posteriormente nos ensaios de validação.

Os ensaios foram realizados a uma pressão de suprimento p_s de 30, 70 e 130 bar, e a uma temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Devido à semelhança dos resultados, foram escolhidos para apresentação neste trabalho aqueles obtidos a uma p_s de 70 bar. Para descrição do circuito hidráulico, será utilizada a simbologia da Tabela 6.1.

7.1: Ensaio com travamento do carretel

Para obter a condição de travamento do carretel foi utilizado um acionador externo da própria válvula, através do qual era possível limitar-se o deslocamento do carretel. Este acionador era mantido pressionado (através de um parafuso conforme Figura 7.1) de maneira que o deslocamento do carretel não fosse superior (travasse) a aproximadamente 8 V. Esse valor foi obtido e decidido experimentalmente monitorando-se a posição do carretel e observando o aumento da corrente demandada pelo solenóide à fonte, mantendo-se o cuidado para que não provocar danos ao solenóide devido sobrecorrente.

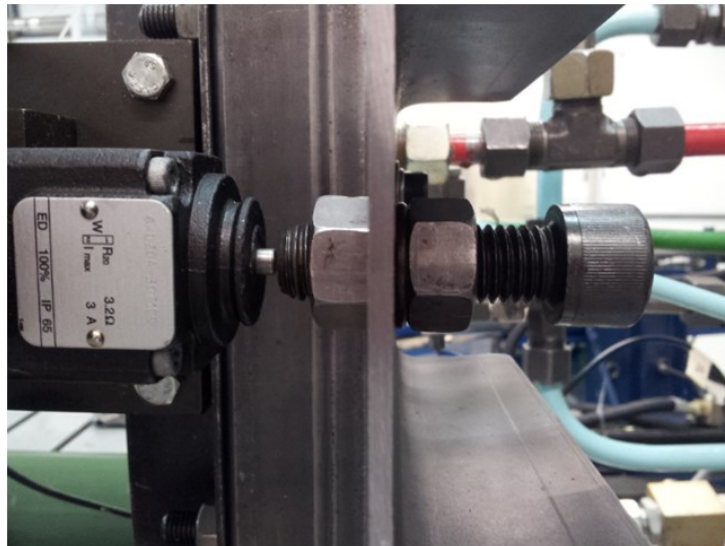


Figura 7.1 – Detalhe de como foi feito o travamento do carretel através do botão externo à válvula.

Além disso, como o botão fica do lado direito da válvula, limitou-se apenas o deslocamento do carretel à direita do centro desta, próximo ao limite de subida do sinal de controle. Feito isto, a válvula foi mantida em malha fechada de posição do atuador e foi observada a resposta do sistema de monitoramento. Para tanto, as válvulas 1V2, 1V3 e 1V4 foram abertas e as válvulas 1V5 e 1V6 fechadas.

7.1.1: Ensaio de travamento com referência senoidal

Foi aplicada uma referência senoidal ao atuador com offset de 250 mm e amplitude de 25 mm a 0.5 Hz por 50 segundos de duração e foram coletados os respectivos dados. Na Figura 7.2 observam-se, em detalhe, os primeiros 20 segundos do travamento de posição do carretel em comparação a sua operação normal em malha fechada.

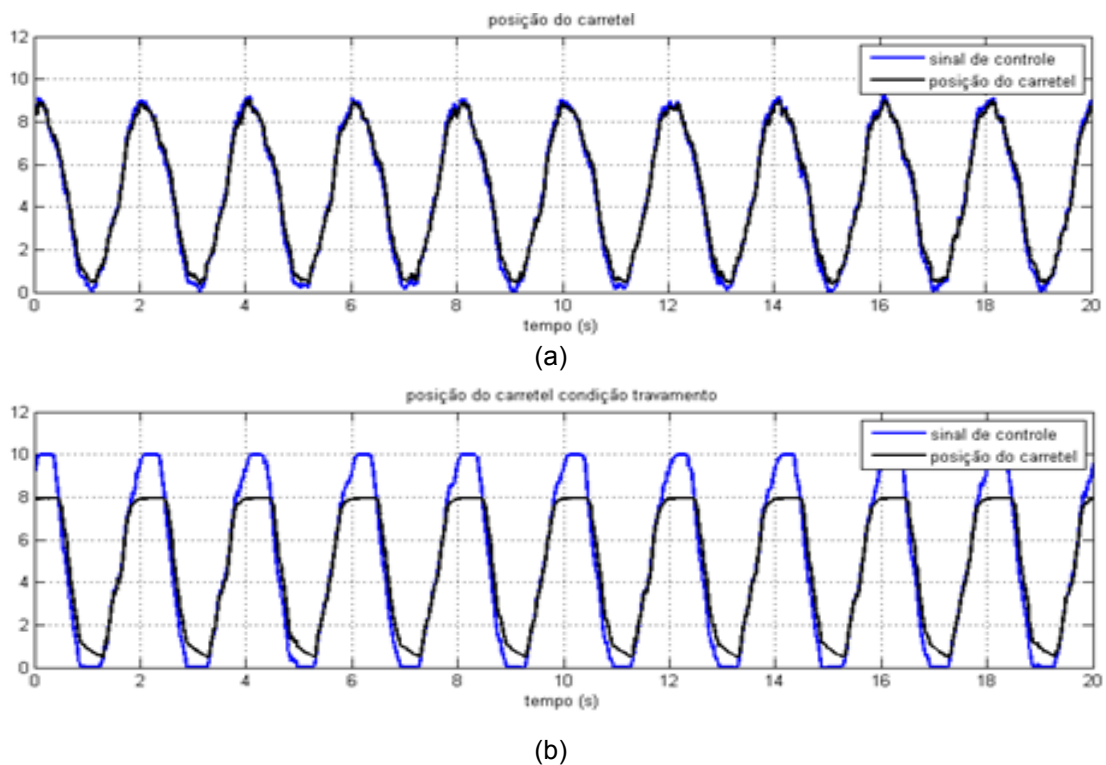
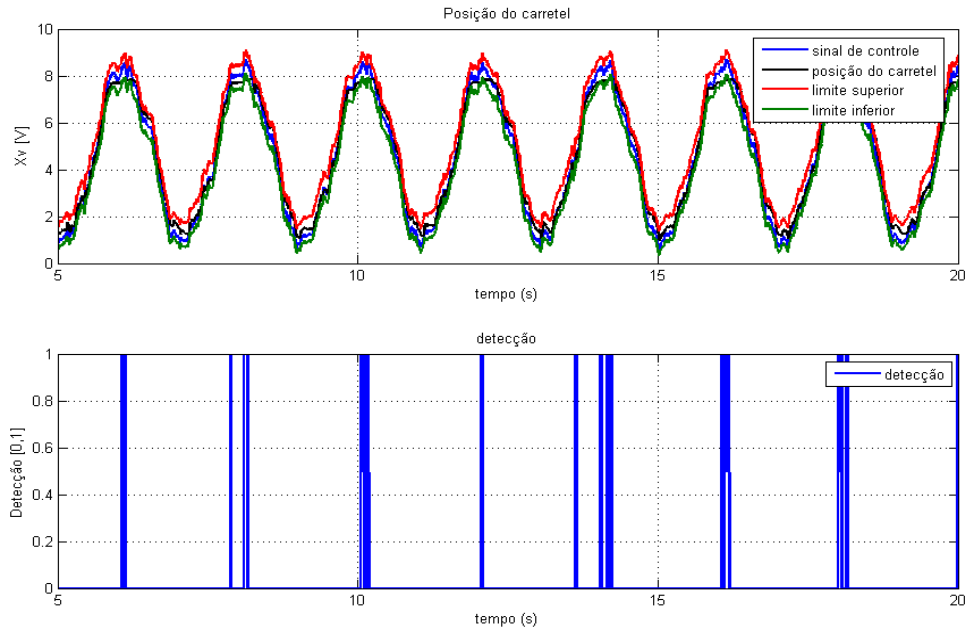


Figura 7.2 – Carretel em condição normal (a) e válvula com carretel travado (b).

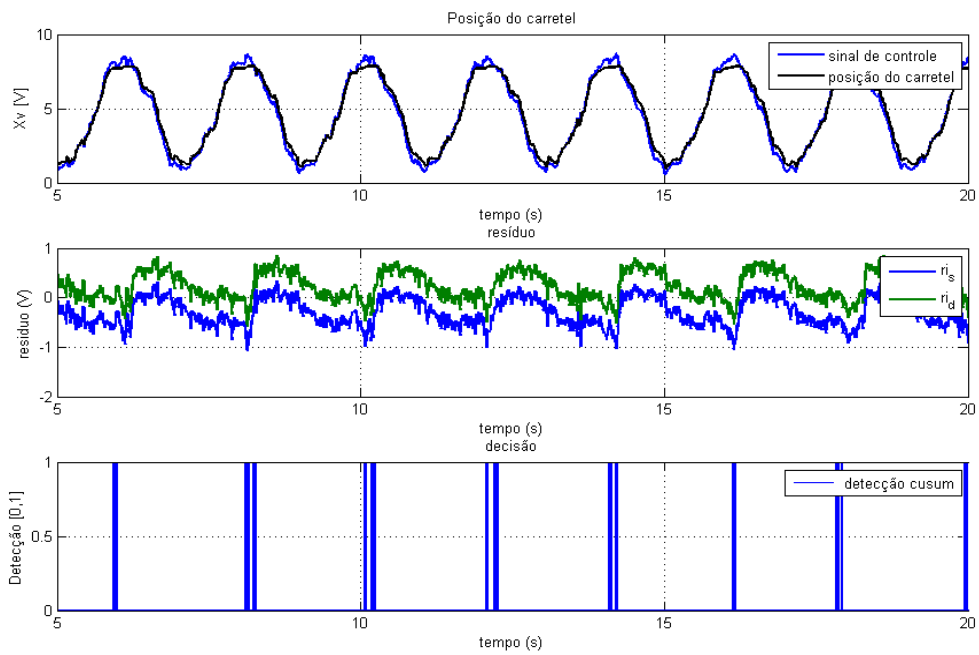
Esta situação poderia corresponder, por exemplo, a uma partícula sólida contaminante proveniente do óleo, ou a um defeito mecânico impedindo o deslocamento livre do carretel. A ideia basicamente era simular uma situação similar a estas.

A Figura 7.3 apresenta os resultados de saída de ambos os métodos de detecção do sistema de monitoramento para sete ciclos do período de coleta

de dados, detalhando também os sinais de resíduo que são entrada do algoritmo de detecção de mudanças abruptas.



(a)



(b)

Figura 7.3 – Resultados do sistema de monitoramento por (a) verificação de limites e por (b) algoritmo de detecção de mudanças abruptas .

As Figuras 7.4 e 7.5 apresentam o detalhe das detecções. Ainda que seja uma falha periódica e prevista, ambos os métodos detectaram corretamente a anomalia.

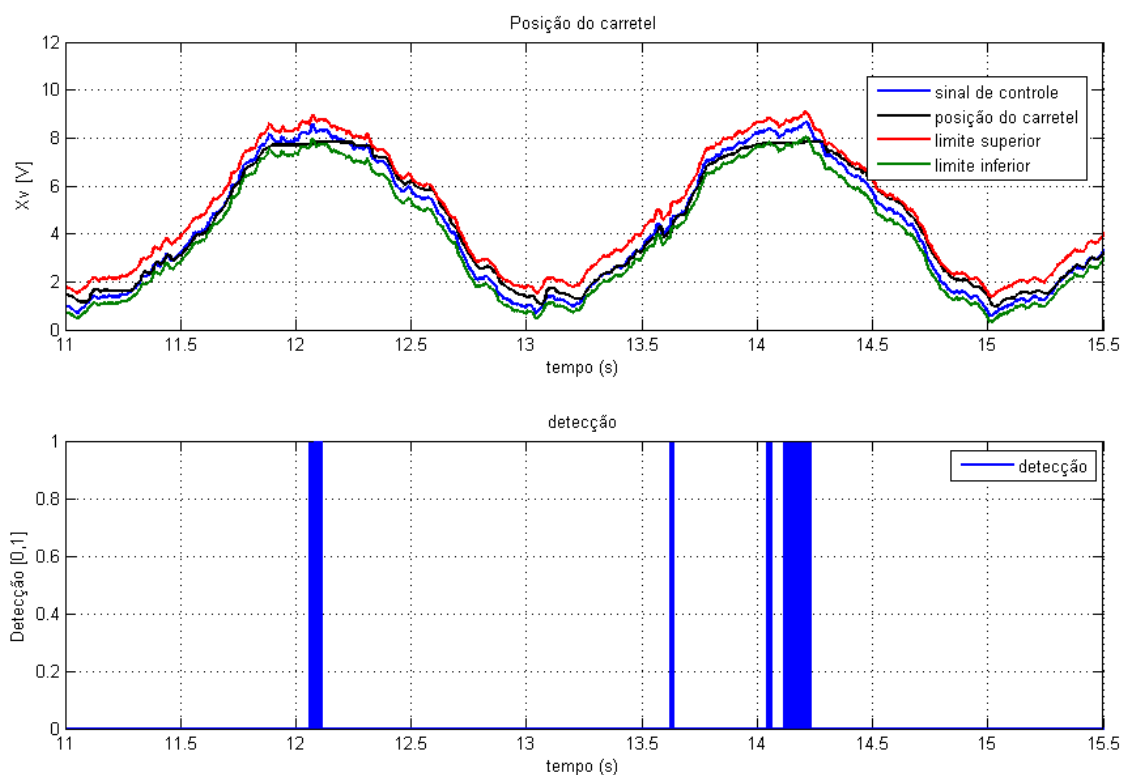


Figura 7.4 – Detalhe da saída do método de detecção por verificação por limites

Por se tratar de uma falha abrupta, o algoritmo de detecção de mudanças abruptas na média do sinal de resíduo apresentou um número maior de detecções por período como era de se esperar. Em respeito ao método de verificação de limites dinâmicos, este apresentou alguns falsos alarmes, em especial, devido ao atraso da resposta da válvula, situação que pode ser vista na Figura 7.4 acima por volta dos 13.5 segundos, e que também era prevista, haja vista certa limitação do método neste sentido.

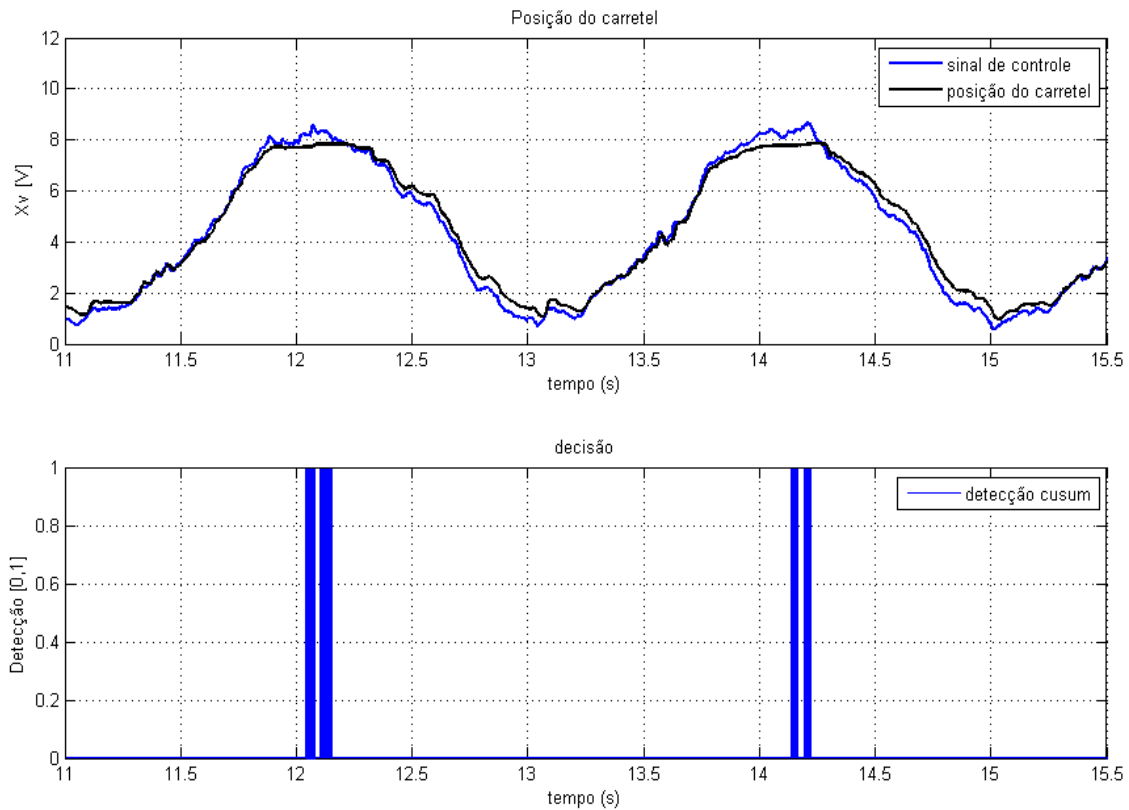
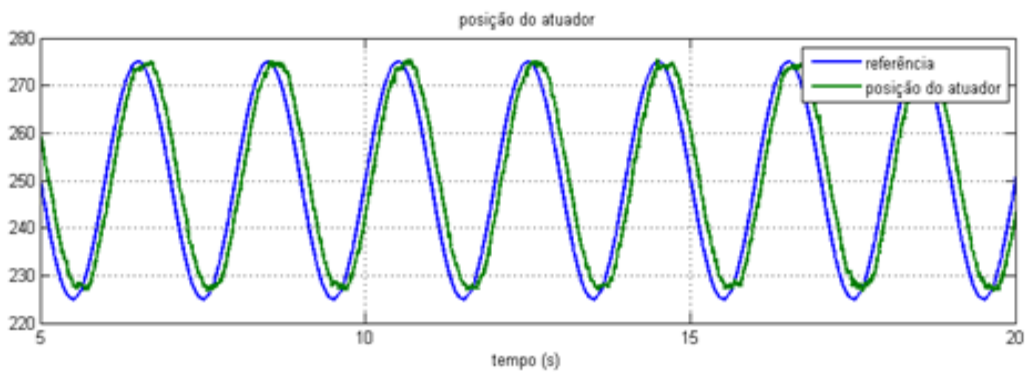


Figura 7.5 – Detalhe da saída do método de detecção por mudanças abruptas na média do sinal de resíduo.

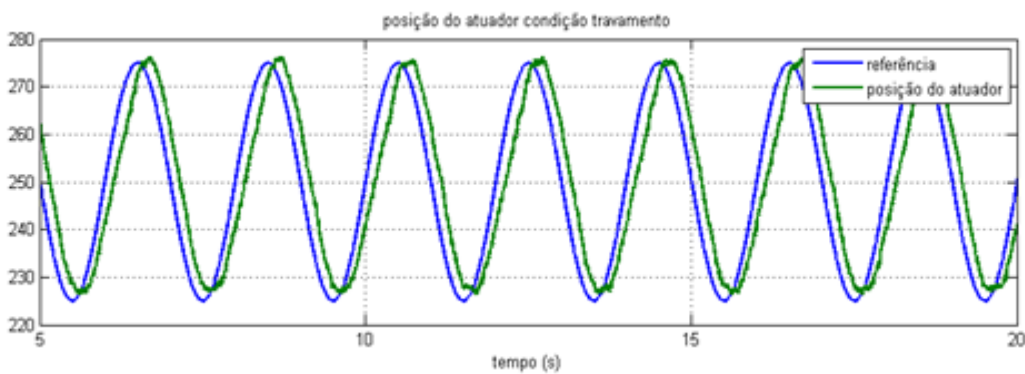
Em se tratando de desempenho do posicionamento do atuador na posição desejada, esta limitação de deslocamento do carretel à direita do centro da válvula, e com esta frequência e amplitude de referência, não foi suficiente para que a válvula apresentasse grande perda de desempenho. De fato, esta alegou pouca deficiência para posicionar o atuador na posição de referência, a menos de um leve atraso que pode ser justificado pela limitação na vazão ocasionada pela inclusão da falha, embora a variação do erro de posição do atuador foi pouco percebida pelo sistema.

Esta situação expressa a vantagem de se adotar a manutenção de condição (preditiva) para monitoramento de processos. Com a válvula atuando em malha fechada de posição de um ou mais atuadores, o operador do sistema dificilmente observaria uma anormalidade no processo, mesmo esta existindo e

possivelmente acarretando uma parada no sistema por danificação de equipamentos em curto prazo.



(a)



(b)

Figura 7.6 – Posição do Atuador dada referência de posição para a situação de condição normal (a) e de travamento do carretel (b).

7.1.2 Ensaio de travamento com referência do tipo degrau

Neste ensaio, um conjunto de sinais de referência do tipo degrau com 50 mm de amplitude foram aplicados, com o objetivo de avaliar o comportamento da válvula em regime permanente de posição do atuador. No entanto, quando esta tenta posicionar o cilindro na posição de referência, a válvula desloca seu carretel até o limite de posição correspondente a 8V, permanecendo nesta posição até o atuador atingir referência, quando então o carretel é permitido retornar à posição central, bloqueando a passagem de fluido e mantendo assim

o atuador na posição desejada. Deste modo, o travamento do carretel só pode ser observado no transitório do sistema, pois em regime permanente o carretel se encontra na posição central da válvula (aproximadamente 5V), não possuindo limitação de qualquer tipo. Mesmo para diferentes amplitudes de degraus de referência, com esta limitação de posição do carretel a 8V, o processo consegue manter o atuador na posição, a menos de um atraso correspondente a não abertura total do orifício . A Figura 7.7 ilustra a condição.

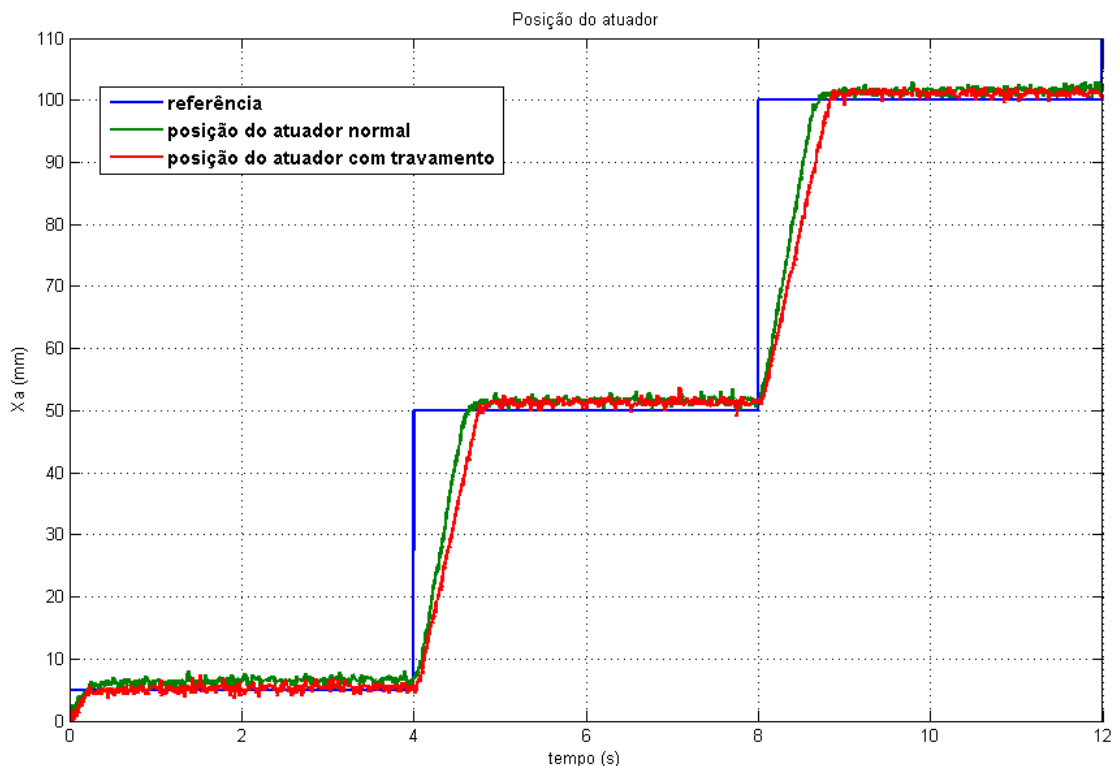


Figura 7.7 – Posição do atuador em condição de travamento do carretel em comparação à condição normal para diferentes amplitudes de sinal de referência.

O que poderia ser feito em relação ao sistema de detecção seria descartar os dados obtidos nos primeiros momentos de variação brusca do sinal de comando de posição para a válvula. Segundo [4], uma variação é considerada brusca quando esta superar uma determinada porcentagem do sinal de comando de posição nominal dentro de um determinado período de

tempo. Quanto tempo o período de descarte deverá durar, e o que deve ser considerada uma variação brusca dependerá das características construtivas da válvula, como por exemplo, a inércia de seus componentes móveis.

As Figuras 7.8 e 7.9 a seguir evidenciam a diferença das respostas de cada método do sistema de monitoramento para a condição de travamento em regime transitório. Considerando-se um período de descarte de aproximadamente 50 ms do transitório do processo, o sistema de monitoramento já seria capaz de realizar a detecção do travamento com sucesso.

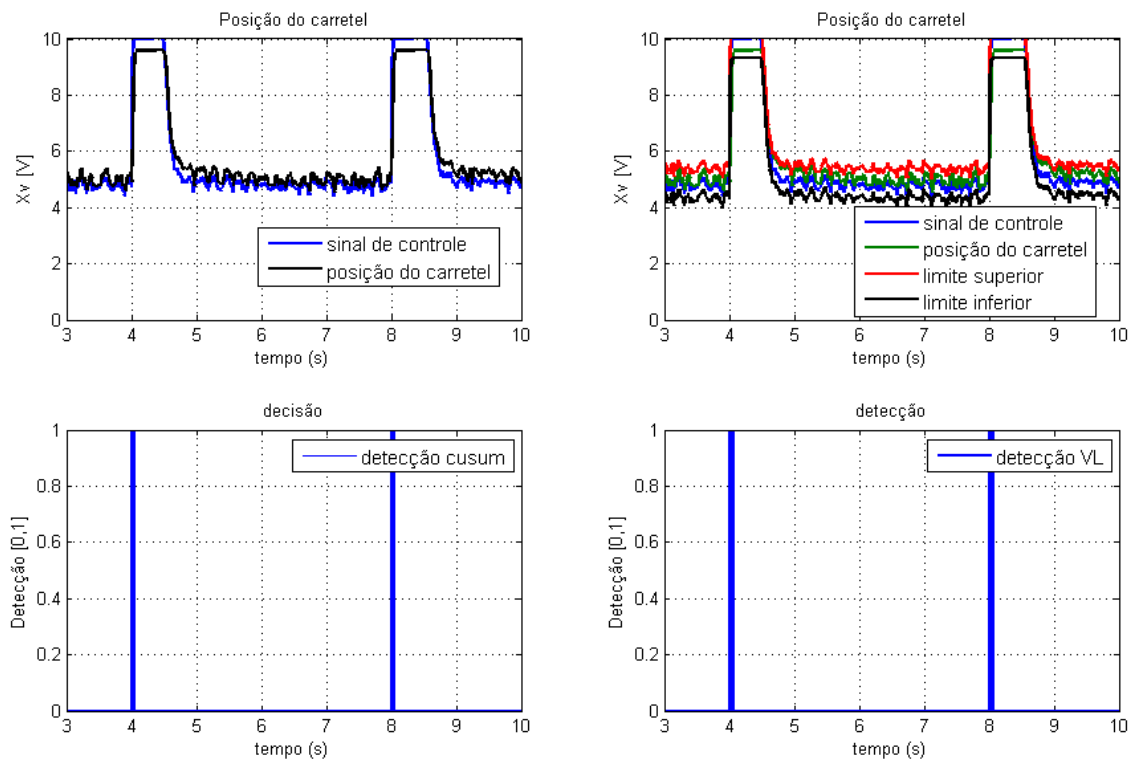


Figura 7.8 – Resposta do sistema de monitoramento em condição normal de operação da válvula quando da aplicação de dois degraus de referência.

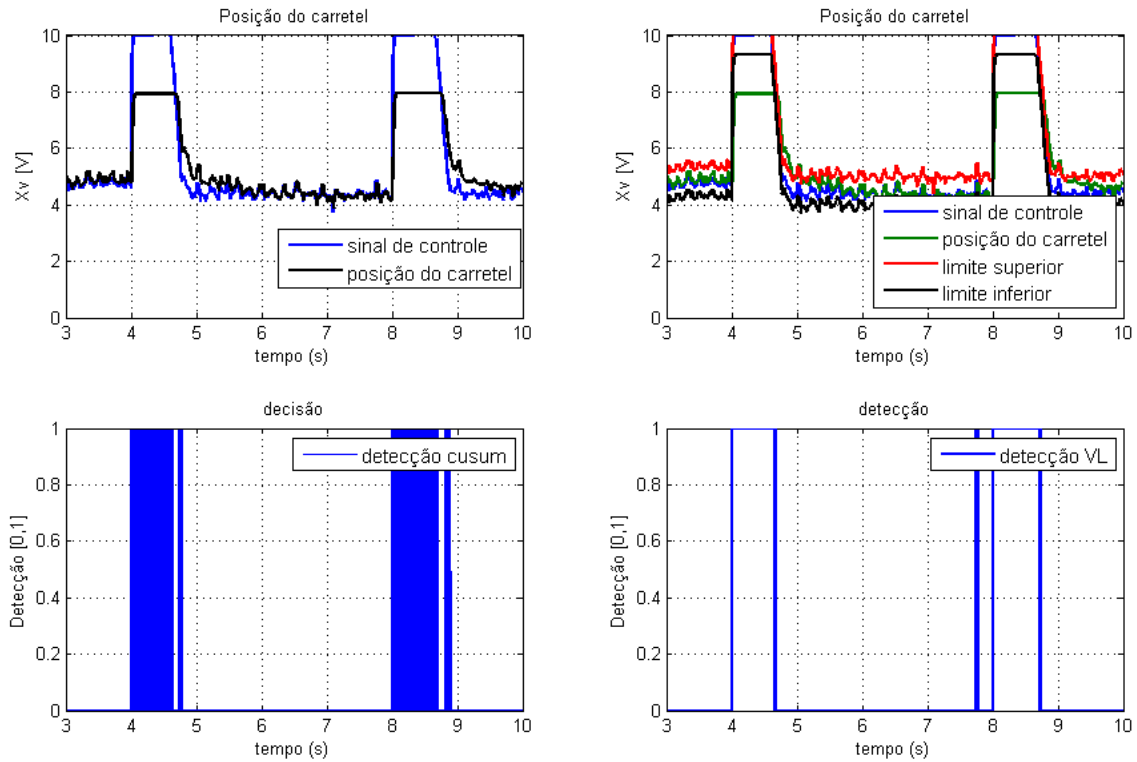


Figura 7.9 – Resposta do sistema de monitoramento aplicado ao processo dada condição de travamento do carretel.

7.2: Ensaios com a válvula contaminada

Para a contaminação do carretel utilizou-se cola do tipo *araldite* (*epóxi*) em alguns dos entalhes dos ressaltos do carretel, conforme Figura 7.10, a fim de simular acúmulo de verniz ou partículas sólidas nos mesmos.

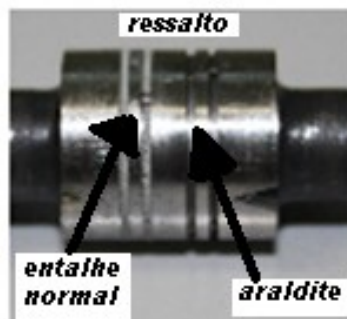


Figura 7.10 – Contaminação do carretel com a cola araldite.

Os ensaios foram realizados sob as mesmas condições de operação (p_s a 70 bar e temperatura a $40\pm 2^\circ\text{C}$) e em malha fechada de posição do atuador que na condição de falha anterior.

7.2.1: Ensaios de contaminação com referência senoidal

Utilizou-se referência senoidal para posição do atuador com offset de 250 mm e amplitude de 20 mm, a uma frequência de 0.5 Hz. Os dados foram coletados por 50 segundos. A seguir, na Figura 7.11, o registro da posição do carretel contaminado é apresentado em comparação a sua condição normal de operação. Apenas os primeiros ciclos são apresentados para melhor visualização.

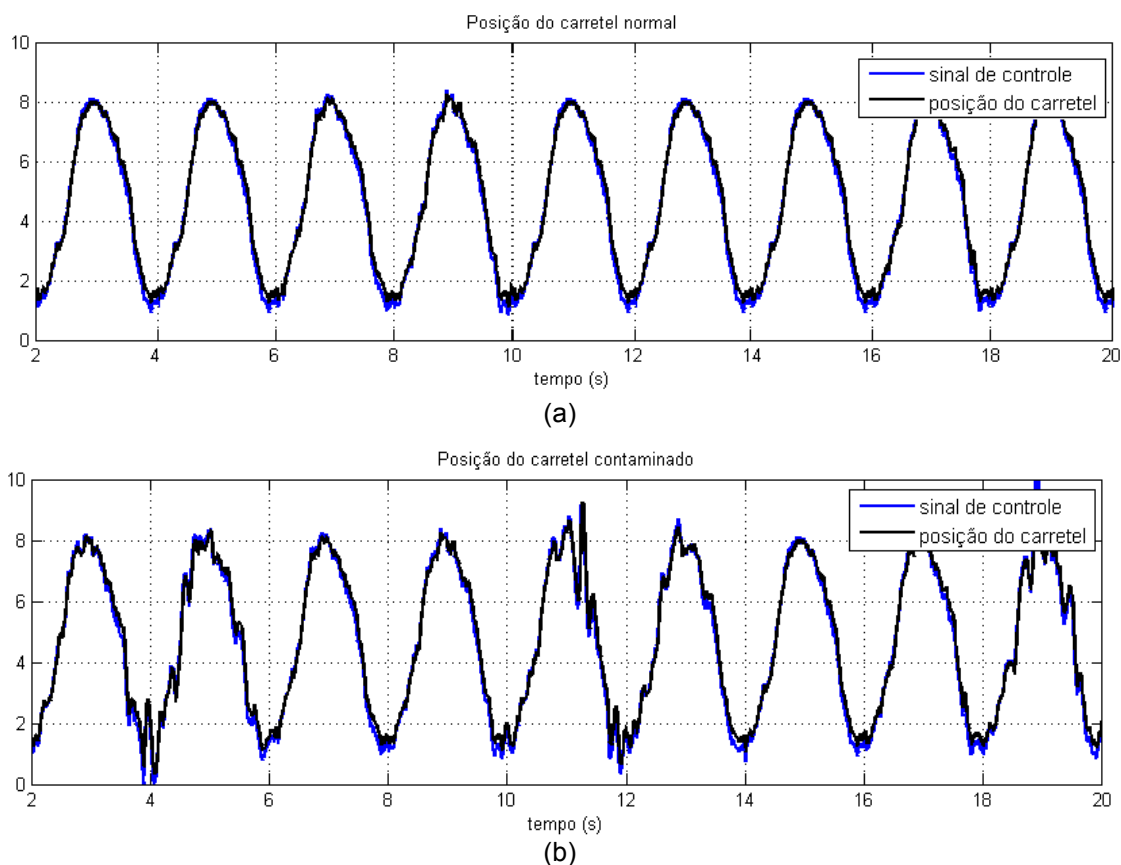
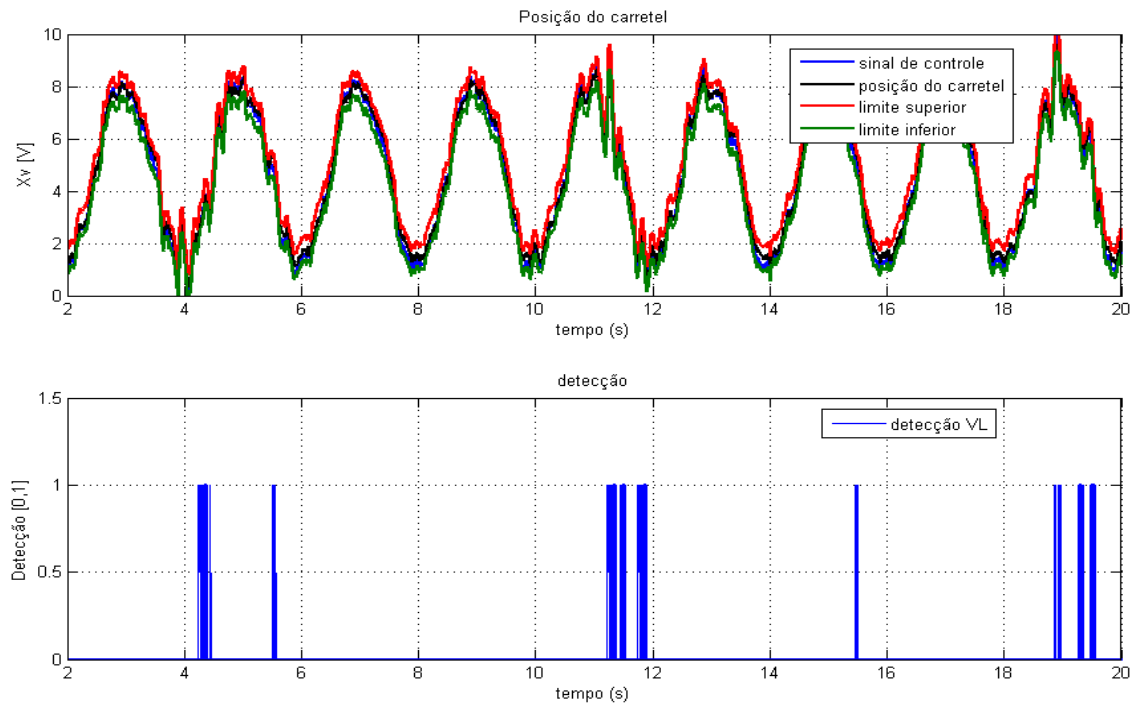


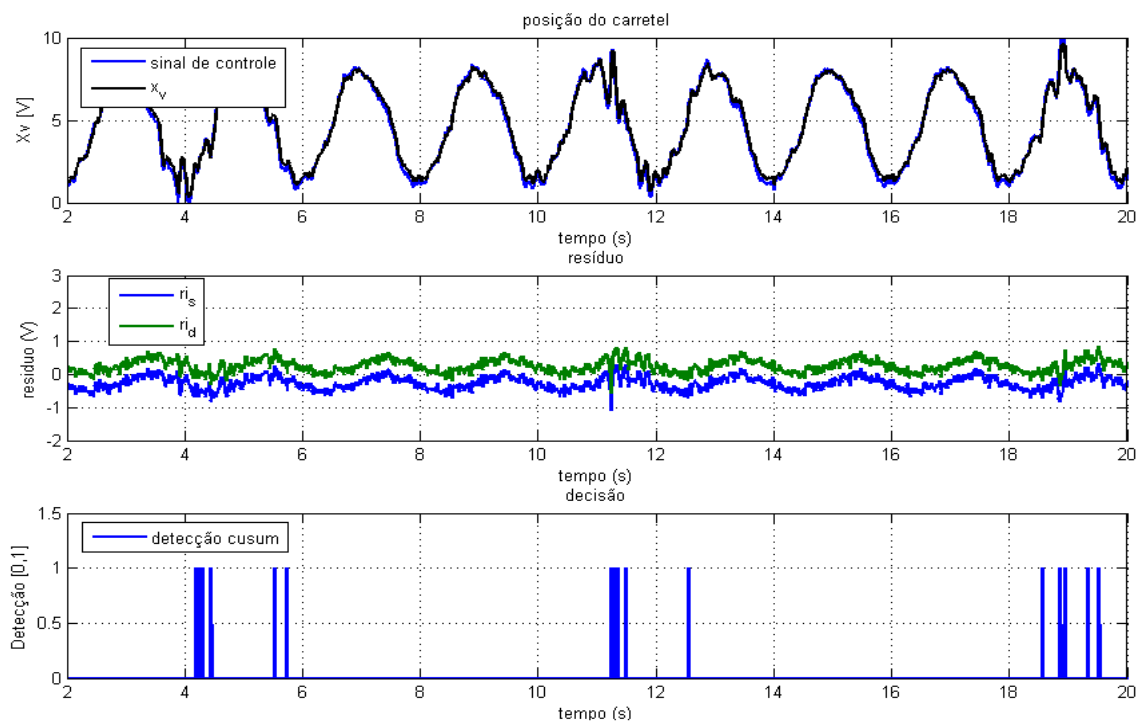
Figura 7.11 – Carretel em (a) condição normal e (b) contaminado.

Observa-se de antemão que a válvula apresentou certa dificuldade de posicionar seu carretel, por exemplo, por volta do quarto segundo. A Figura

7.12 ilustra como se comportou o sistema de monitoramento considerando-se 8 ciclos dos dados do conjunto de aquisição.



(a)



(b)

Figura 7.12 – Resultados do sistema de monitoramento pelo método (a) verificação de limites e por (b) mudanças abruptas para a válvula em condição contaminada.

Pode-se notar que a contaminação dos ressaltos prejudicou o posicionamento do carretel em alguns intervalos, especialmente nos extremos de amplitude do sinal senoidal. As Figuras 7.13 e 7.14 apresentam as respostas do sistema de monitoramento de condição ampliadas em um intervalo de detecção observado.

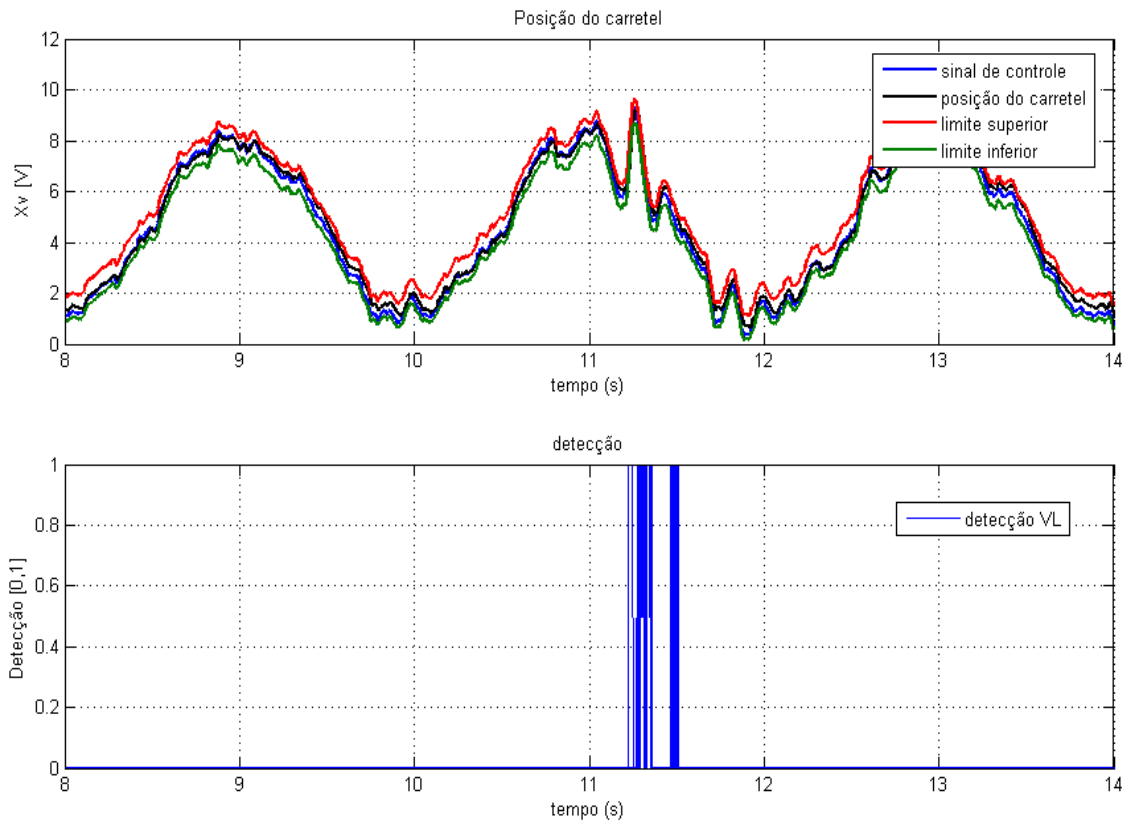


Figura 7.13– Detalhe da saída do método de detecção para carretel contaminado a partir da verificação de limites.

Da Figura 7.12 percebe-se que ambos os métodos de detecção exibiram respostas à existência de alguma anomalia aproximadamente nos instantes em que válvula apresentava maior vibração do carretel.

Já nas Figuras 7.13 e 7.14, observa-se, em detalhe, que as detecções foram mais escassas que para a condição de travamento e que provavelmente ambos os métodos apresentaram um maior número de falsos alarmes, o que é

difícil julgar, pois seria necessária uma análise mais minuciosa do que realmente pode ser considerado como falha na atual condição, o que também pode ser justificado pela aleatoriedade de aparição das tais vibrações. Porém, isso já seria tarefa para um sistema de diagnóstico de falhas que, por possuir

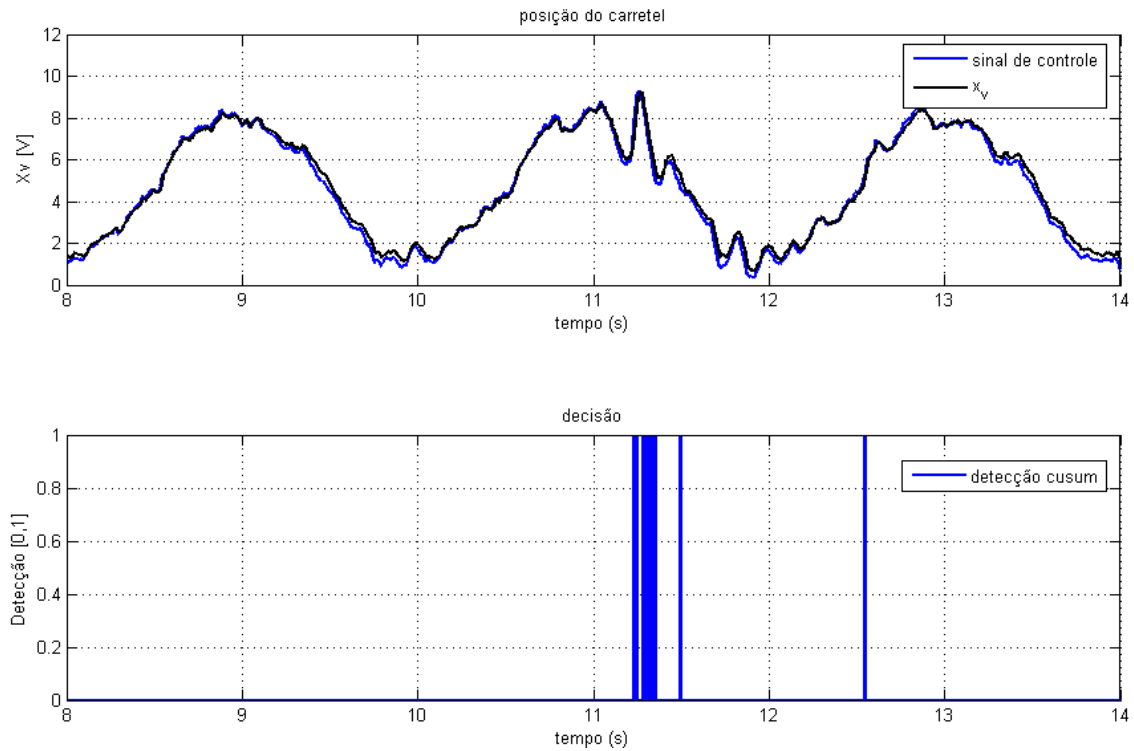


Figura 7.14 – Detalhe da saída do método de detecção para carretel contaminado por mudanças abruptas nos sinais de resíduo.

uma maior quantidade de informações sobre a relação entre os fenômenos inerentes da válvula e os sintomas (sinais) provenientes dos métodos de detecção, é capaz de tomar uma decisão mais confiável a favor ou não da presença de anomalias no sistema. Ainda assim pode-se dizer que o sistema cumpriu com o seu papel, ou seja, conseguiu detectar que havia algo de errado (ou inesperado, fora do comum) com a válvula através do indevido posicionamento do carretel, e de mudanças abruptas na média deste sinal.

O posicionamento do atuador apresentou o mesmo reflexo do comportamento vibratório e aleatório do posicionamento do carretel, ainda que, a menos dessas situações, apresentasse seguimento da referência, como pode ser visto em detalhe na Figura 7.15.

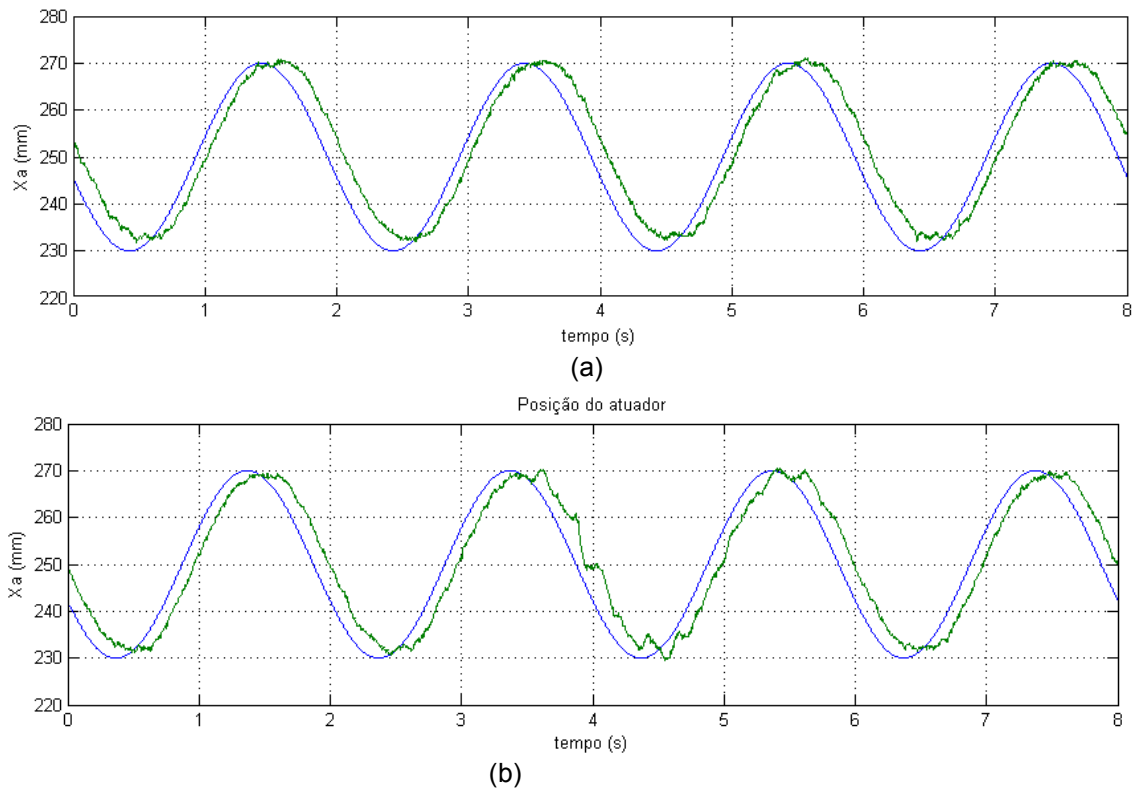
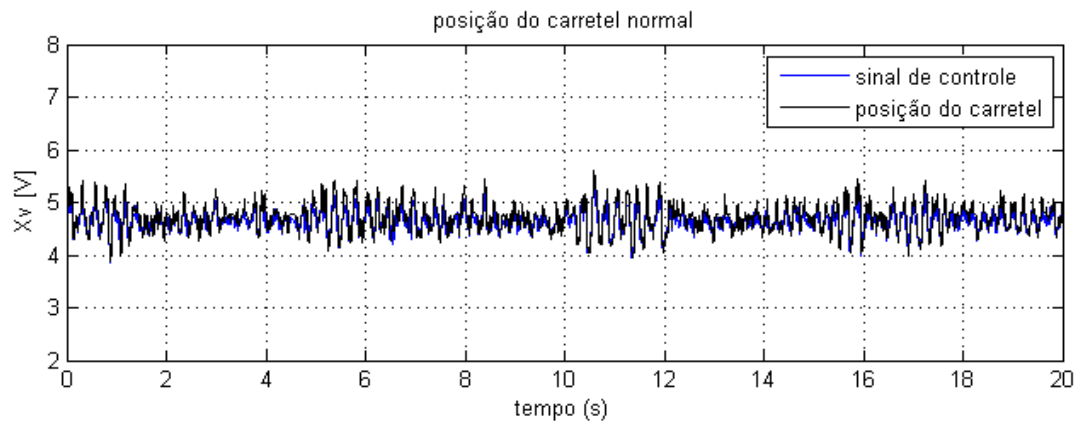


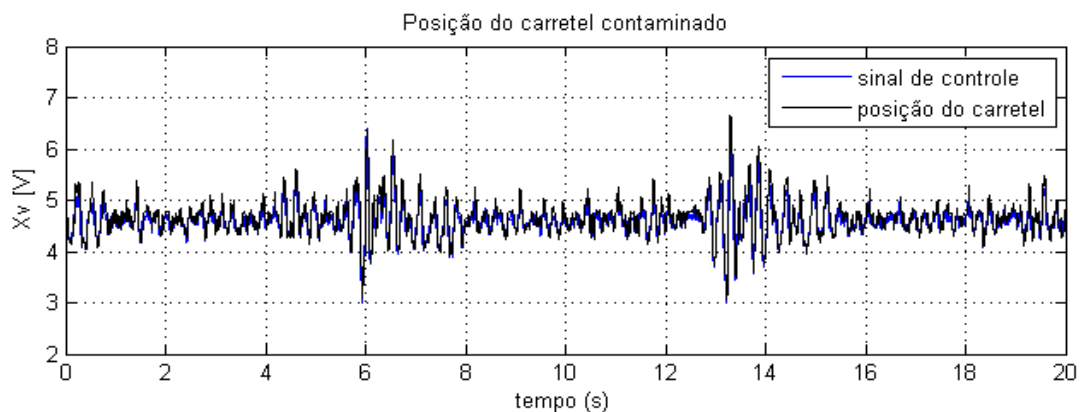
Figura 7.15 – Posicionamento do atuador com a válvula em condição normal (a) e contaminada (b).

7.2.2: Ensaio de contaminação com referência do tipo degrau

Neste ensaio aplicou-se uma referência do tipo degrau com amplitude 250 mm de posição do atuador (metade de seu comprimento total), onde se avaliou o regime permanente do sistema durante 50 segundos. Seguindo com a cronologia de apresentação de resultados, na Figura 7.16 podem ser vistos os primeiros 20 segundos de regime permanente com o carretel contaminado em comparação a sua condição normal de operação.



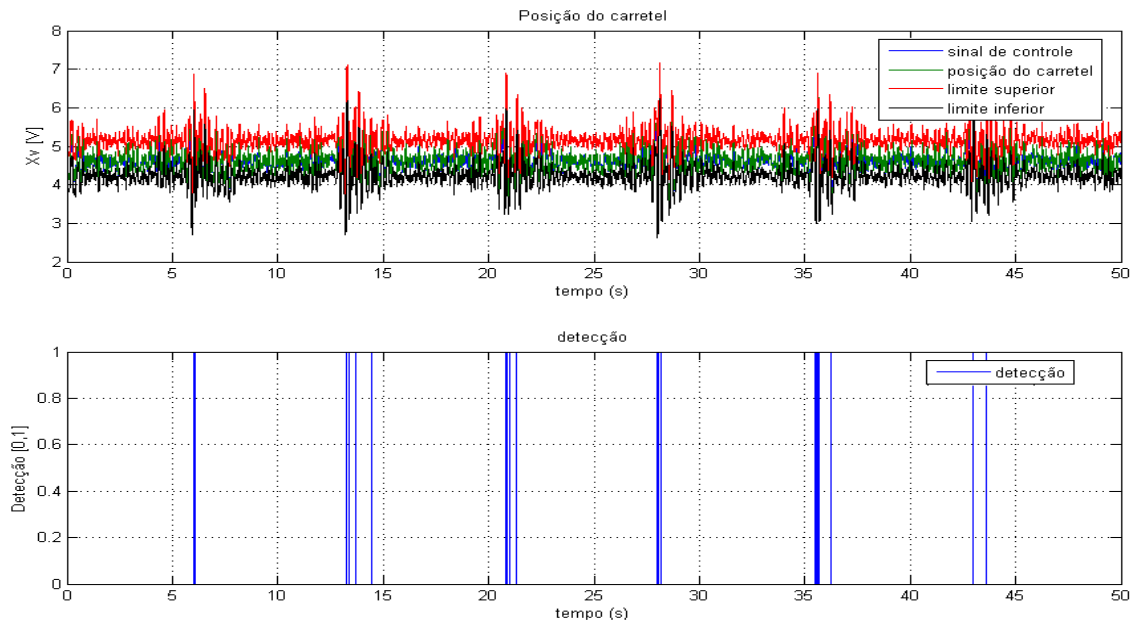
(a)



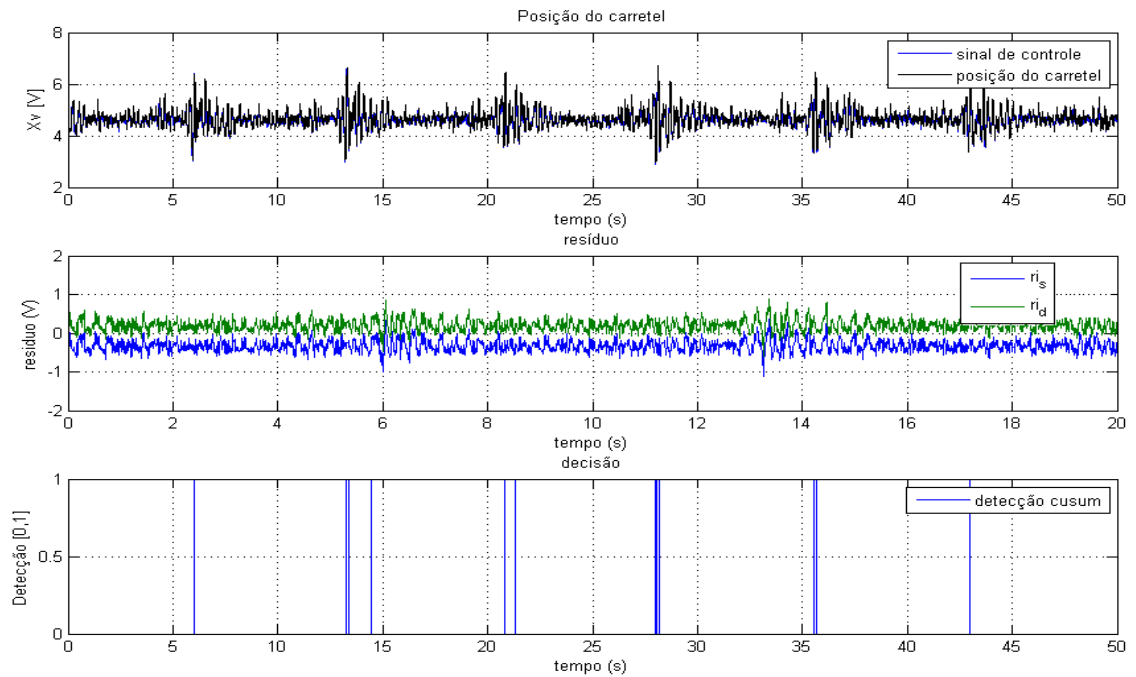
(b)

Figura 7.16 – Posição do carretel em regime permanente de posição do atuador em situação (a) normal e situação (b) contaminada.

Pode-se notar que o sinal da posição do carretel apresenta vibrações mais notáveis em seu posicionamento na condição de regime permanente do que quando em regime de posição senoidal. Devido à sujeira nos entalhes do carretel há uma menor vazão das áreas de maior pressão para as áreas de menor pressão em torno da circunferência do carretel provocando uma força resultante de tais pressões, o que dificulta a centralização do carretel. O resultado dessa força resultante pode ser visto através das vibrações que contaminaram a resposta de posicionamento do carretel e conseqüentemente do atuador nestes ensaios. Na seqüência, na Figura 7.17 é apresentado o resultado para cada método de detecção.



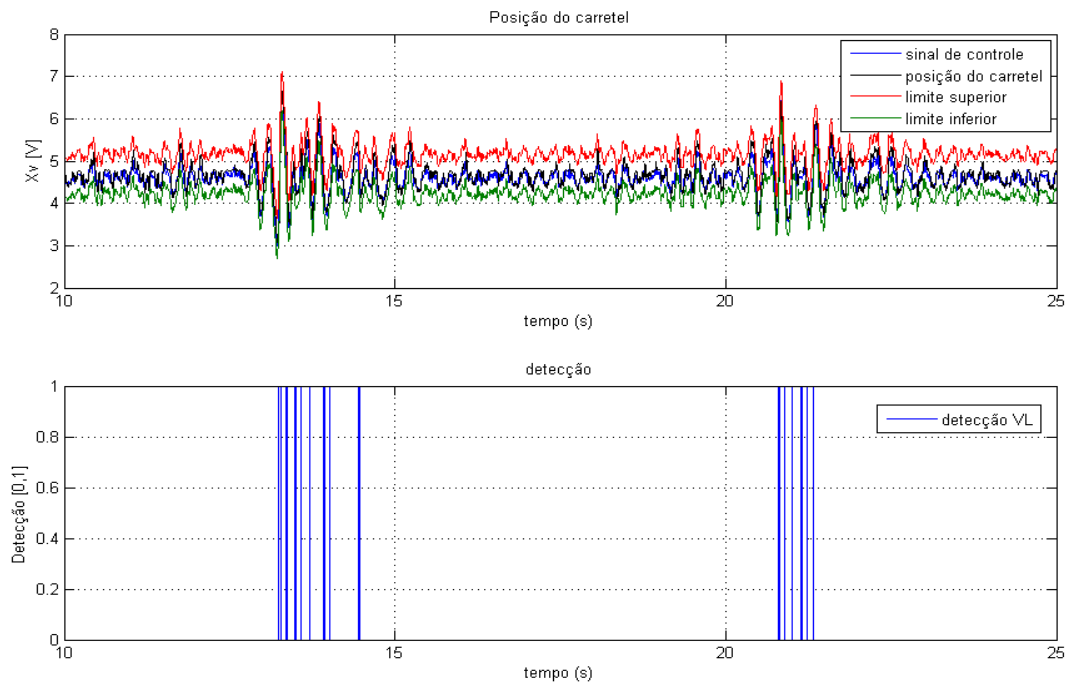
(a)



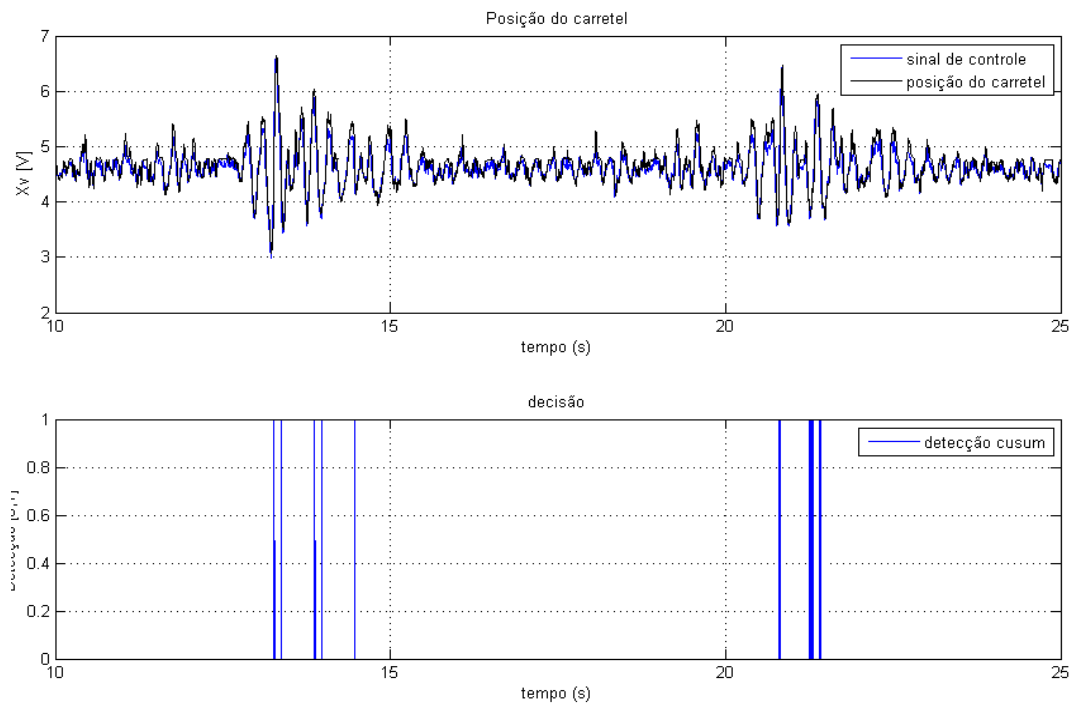
(b)

Figura 7.17 - Resultados do sistema de monitoramento para os métodos (a) verificação de limites e (b) detecção de mudanças abruptas para a válvula em condição contaminada e em regime permanente.

Em seguida, pela Figura 7.18, o detalhe das detecções é apresentado.



(a)



(b)

Figura 7.18– Detalhe da saída dos métodos de detecção para carretel contaminado: (a) verificação por limites e (b) algoritmo de detecção de mudanças abruptas para a válvula em condição contaminada e em regime permanente.

Analisando-se as duas últimas imagens, nota-se que o sistema de monitoramento de condição com seus dois métodos apresentaram resultados satisfatórios quanto à detecção das vibrações no carretel, como é possível observar nos detalhes da Figura 7.18, sendo que o método por verificação de limites mostrou-se mais sensível, com um número maior de detecções quanto às diferenças de posição do carretel, enquanto o método por detecção de mudanças abruptas apresentava respostas apenas para as vibrações mais abruptas, de maior intensidade. Em resumo, ambos conseguiram cumprir com seu objetivo em alertar uma anomalia no sistema.

O resultado do posicionamento do atuador apresentado na Figura 7.19 corrobora com o que era esperado na atual condição do ensaio pela presença de arritmia do sinal de posição resultante das vibrações do carretel.

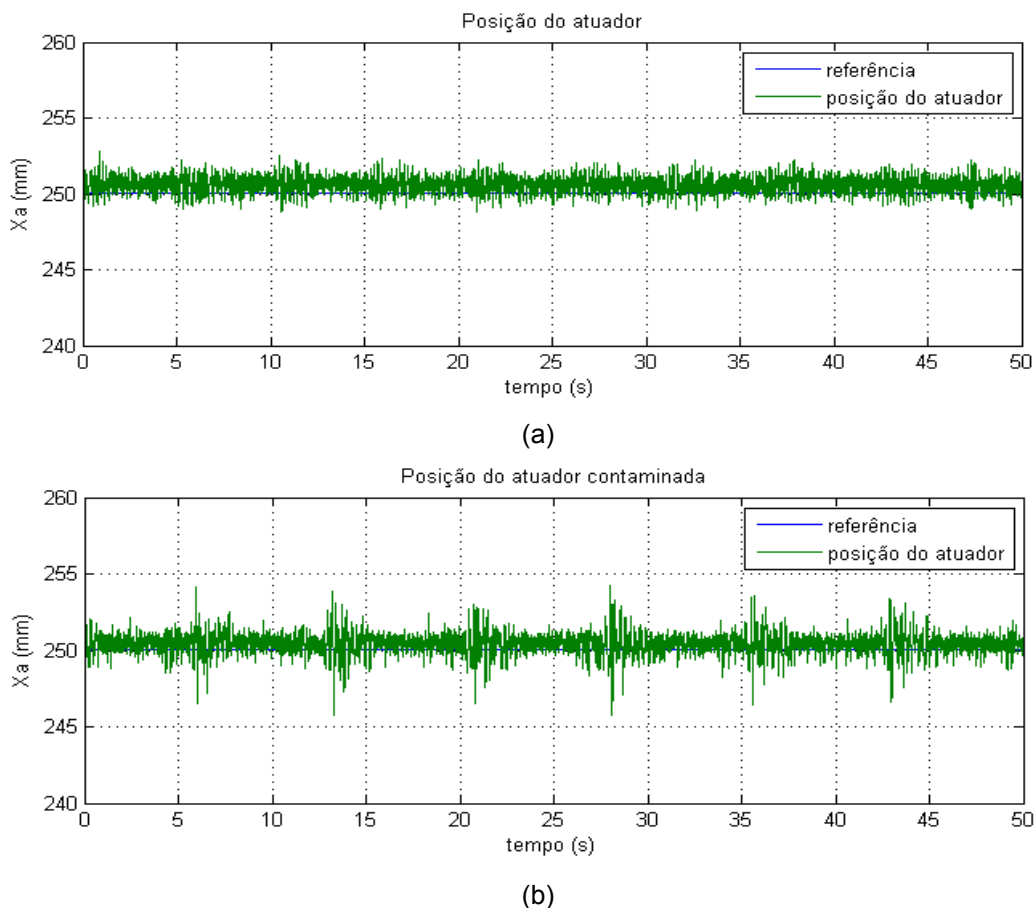


Figura 7.19 – Posicionamento do atuador em regime permanente com a válvula em condição (a) normal e (b) contaminada.

Capítulo 8: Conclusões e perspectivas futuras

Neste capítulo, o sistema de monitoramento de condição é avaliado segundo os resultados obtidos nos ensaios de validação e sob perspectivas de continuação e extensão do projeto para outras falhas e outros componentes do sistema regulador de velocidade.

8.1: Avaliação do sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento é aqui avaliado com base nos resultados obtidos apresentados no capítulo anterior sob alguns aspectos considerados mais relevantes, em especial referindo-se à metodologia para a implementação e aplicação deste sistema.

8.1.1: Resultados dos métodos de detecção

Analisando os resultados dos ensaios de validação do sistema de monitoramento apresentados e comentados no capítulo anterior, pode-se avaliar que, em geral e apesar de suas particularidades, ambos os métodos de detecção utilizados apresentaram respostas muito semelhantes para as condições impostas, havendo poucos casos de condições evidentes de falha, onde os métodos deveriam apresentar detecção, mas apenas um deles apresentou. Sendo assim, para as condições de falhas aqui estudadas, nenhum dos métodos apresentou desempenho superior ao outro, e sua utilização conjunta pode ser considerada redundante.

8.1.2: Uso de ensaios de experimentação para caracterização do sistema

O fato de o sistema precisar fazer uso de informações somente levantadas por experimentação faz desta atividade requisito essencial e necessária para seu funcionamento. Esta é uma desvantagem com relação a métodos de monitoramento que utilizam modelagem matemática por equações

diferenciais para representar o sistema a ser monitorado. Todavia, há de se constatar que, dispondo-se de algumas informações como o histórico de dados de sinal de controle e posição do carretel da válvula proporcional de um regulador de velocidade, é possível implementar o sistema de monitoramento, desde que esses dados sejam obtidos quando do bom funcionamento do regulador (os chamados dados de treinamento), e simular o sistema com boa representatividade principalmente do algoritmo de detecção de mudanças abruptas, o qual pode ser aplicado aos dados de maneira *off-line*, realizando assim boa parte do trabalho de parametrização do sistema.

8.1.3: Tolerância a erros nas funções-limite dinâmicas

Quando da definição das funções-limite, as quais detectam anomalias limitando o posicionamento inferior e superior do carretel, é importante que se avalie os valores adotados para tolerância de erro de posicionamento aceitável. No projeto destas funções, os desenvolvedores optaram por não utilizar como base o sinal de resíduo entre a curva experimental e as funções modelo lineares em cada amostra para definir um limite estático, mas sim utilizar o erro máximo absoluto adicionado de uma tolerância de posicionamento, ajustando os novos pontos de posição do carretel (x_v) obtidos em funções-limite dinâmicas conforme procedimento exposto na seção 5.3.1. Segundo relatório de projeto, essa solução apresentou um número muito inferior de falsas detecções do que quando foram usados limites estáticos, ainda que a maioria destas detecções ocorresse devido ao atraso de resposta da válvula, parâmetro que pode variar de uma válvula para outra. Outro motivo de não utilizar-se o sinal de resíduo com limites estáticos deveu-se ao fato de o controle efetuado, tanto pela malha externa de atuação como pela eletrônica interna da válvula, poder corrigir supostos desvios, mantendo, assim, o erro dentro dos limites, mascarando uma possível falha de menor amplitude. Sendo assim, decidiu-se por utilizar a informação de resíduo como entrada apenas para o método de detecção por mudanças abruptas na média deste sinal.

8.1.4: Escolha dos parâmetros do algoritmo de detecção

Um dos pontos fracos desta abordagem de detecção é a quantidade de parâmetros a serem definidos e a sensibilidade que a saída do método apresenta para uma pequena mudança de seus valores. Assim, para diferentes situações (falhas), existem diferentes parametrizações que favorecem respostas de saída (detecções) deste método mais bem sucedidas em cada caso. Neste trabalho utilizou-se a mesma parametrização para as duas condições de falha, pois era de interesse que o sistema detectasse ambas as falhas não importando, a priori, se respondesse a uma falha melhor que a outra, e considerou-se que os resultados apresentados pelo método foram satisfatórios. Porém, o fato de diferentes parametrizações poderem resultar em diferentes respostas deve ser considerado quando da avaliação deste método para outros tipos de falhas.

8.1.5: Efeito de incertezas de sensoriamento e perturbações

Deve-se levar também em consideração a falsa detecção de falha devido a perturbações externas ao sistema onde a válvula está instalada e às incertezas com relação aos equipamentos de medição utilizados. Assim como um sistema de controle, qualquer sistema de detecção e monitoramento nunca será melhor e sempre dependerá da confiabilidade dos elementos sensores dos quais recebem informações, sofrendo com distúrbios de resultados caso existam falhas (ou desvios de operação) nestes elementos. Ainda que se minimize a quantidade de transdutores utilizados, uma funcionalidade para o monitoramento da condição de sensores, em especial para detecção de *drifting* em suas medições seria uma solução econômica e razoável, segundo [9], em se tratando da confiabilidade destes dispositivos. Um estudo das perturbações de natureza elétrica e mecânica que o sistema hidráulico pode sofrer em campo também deve ser efetuado, para que se possam avaliar os efeitos destas perturbações sobre a válvula e sobre o sistema de monitoramento, permitindo diferenciar tais situações da condição de falha da válvula.

8.1.6: Acoplamento de um sistema de diagnóstico

Como foi mencionado, este trabalho tratou apenas da detecção de anormalidades na válvula proporcional, não se preocupando com a etapa de diagnóstico de um sistema de detecção e diagnóstico de falhas propriamente dito, etapa que de fato é utilizada para afirmar com boa confiabilidade se existem uma ou mais falhas no sistema, além de sua localização e duração. Isso pode ser elaborado através de ferramentas de inteligência artificial, como por exemplo, o reconhecimento de padrões dos sinais de saída do sistema de detecção por uma rede neural bem treinada, ou através de regras sobre o comportamento funcional do sistema. Neste sentido, com base nos ensaios realizados neste trabalho, exemplifica-se de antemão duas regras que devem ser consideradas em se tratando das falhas de travamento e contaminação da válvula proporcional utilizada.

1. Após troca de referência do sinal de entrada, variação brusca do sinal de comando ou mudança de sentido do carretel, deve-se aguardar um instante de tempo (de no mínimo 50 ms como visto na seção 7.1.2) para acomodação do sistema (válvula) antes de realizar leituras, em especial quando a referência é do tipo degrau, e a falha a ser diagnosticada do tipo travamento do carretel.
2. Não se devem considerar detecções singulares isoladas para o diagnóstico de falhas. Pela análise dos resultados e pela própria configuração adotada no caso do algoritmo de detecção de mudanças abruptas, falsos alarmes ocorrem, em geral, por detecções singulares e não por um conjunto de detecções. Assim, para aumentar a confiabilidade do diagnóstico, deve-se avaliar um conjunto de pelo menos duas ou mais detecções em sequência.

8.2: Sugestões para trabalhos futuros

A importância deste trabalho certamente se reflete na sua continuidade. Baseando-se nos resultados obtidos e no tempo restante para finalização do projeto, sugestões de trabalho são apresentadas a seguir.

- Caracterizar e parametrizar o sistema monitorando a corrente da fonte de alimentação da válvula, a fim de verificar e avaliar o padrão dos sinais utilizando esta variável como entrada do modelo experimental da válvula em vez do sinal de comando/controle;
- Realizar ensaios de validação frente a outras falhas na válvula como o desgaste das arestas do carretel;
- Testar e adaptar o sistema de monitoramento para diferentes modelos de válvulas proporcionais, verificando principalmente a influência no comportamento da curva experimental e a sensibilidade de detecção;
- Estender e adaptar o uso do sistema de monitoramento para válvulas distribuidoras;
- Implementar um modelo da válvula utilizando ferramentas de identificação de sistemas e verificar a possibilidade de usar filtragem e estimação de parâmetros para substituir a experimentação como fonte de informação para os sistemas de detecção desenvolvidos no projeto até então.

Referências Bibliográficas:

- [1] ANGELI, C. **On-line Fault Detection Techniques for Technical Systems: A Survey**. International Journal of Computer Science & Applications, Vol. I, 2004. p.12-30.
- [2] ATOS ELECTROHYDRAULICS. **Proportional Directional Valves type DHZO-T and DHZOR-T-Table F165-2/E**. Itália, 2006.
- [3] BASEVILLE, Michele; NIKIFOROV, Igor. V. **Detection of Abrupt Changes: Theory and Application**. Prentice-Hall Inc, 1993. 469p.
- [4] BRANCO RAMOS FILHO, José R. **Análise Teórico-Experimental de Falhas em Válvulas Direcionais Servoproporcionais**. Dissertação de Mestrado, POSMEC, Florianópolis, Julho de 2009. 130p.
- [5] CABRAL SILVA, Diego R. **Sistema de Detecção e Isolamento de Falhas em Sistemas Dinâmicos Baseado em identificação Paramétrica**. Dissertação de Mestrado, Natal/RN, 2008. 115p.
- [6] CHEN, Way-Kay. **The Electrical Engineering Book**. Elsevier, London, 2004. 1228p.
- [7] CHINNIAH, Yuvin A. **Fault-Detection in the Electrohydraulic Actuator using Extended Kalman Filter**. Saskatoon, Canada, 2004. 251p.
- [8] DE NEGRI, Victor J. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e Controle: Parte III – Sistemas Hidráulicos para Controle**. Apostila (POSMEC), UFSC, Florianópolis, 2001. 76p.
- [9] HINES, J. Wesley et al. **Technical Review of On-Line Monitoring Techniques for Performance Assessment Vol 3: Limiting Case Studies**. Department of Nuclear Engineering, Knoxville/TN, 2008. 97p.
- [10] ISERMANN, Rolf. **Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**. Springer, 2006. 475p.

- [11] KINNAERT, Michael. **Fault detection and isolation in current and voltage sensors of doubly-fed induction generators**. 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, 2009. p1360-1364.
- [12] LABORATÓRIO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E PNEUMÁTICOS. **[Quem somos]**. Disponível em <<http://laship.ufsc.br/site/quem-somos/>>. Acesso em 31 de janeiro de 2014.
- [13] LINEAR variable differential transformer. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/LVDT>>. Acesso em 30 de Janeiro de 2014.
- [14] MURARO, Irving. **Estudo das características comportamentais de válvulas proporcionais e seus efeitos nos posicionadores eletrohidráulicos**. Dissertação de Mestrado, POSMEC. Florianópolis/SC, Fevereiro de 2010. 176p.
- [15] REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **Sistemas Hidráulicos e Reguladores de Velocidade**. Programa de Aperfeiçoamento em Automação Industrial, Reivax, Florianópolis, 2008. 76 p.
- [16] REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **[História da Reivax]**. Disponível em <<http://www.reivax.com/br/pt-br/historia-reivax.html>>. Acesso em 31 de janeiro de 2014.
- [17] TYPE I and type II errors. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Type_I_and_type_II_errors>. Acesso em 31 de Janeiro de 2014.
- [18] VERDIER, Ghislain; HILGERT, Nadine; VILA, Jean-Pierre. **Adaptive threshold computation for CUSUM-type procedures in change detection and isolation problems**. Elsevier, France, 2008. p. 4161-4174.