

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DETECÇÃO DO AGARRAMENTO EM VÁLVULAS DE
CONTROLE PARA SINAIS COM REFERÊNCIA VARIÁVEL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jônathan William Vergani Dambros

Porto Alegre

2016

DETECÇÃO DO AGARRAMENTO EM VÁLVULAS DE CONTROLE PARA SINAIS COM REFERÊNCIA VARIÁVEL

Jônathan William Vergani Dambros

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração: Pesquisa e Desenvolvimento de Processos

Linha de Pesquisa: Projeto, Simulação, Modelagem, Controle e Otimização de Processos.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Prof. Dr. Marcelo Farenzena

Porto Alegre

2016

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação Detecção do Agarramento em Válvulas de Controle para Sinais com Referência Variável, elaborada por Jônathan William Vergani Dambros, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Prof.

Prof.

Prof.

Resumo

A oscilação em malhas de controle é um problema frequente na indústria, atingindo cerca de 30% das malhas, entre as causas, o agarramento em válvulas de controle possui maior incidência. O agarramento é a resistência ao movimento da haste da válvula devido à presença de atrito estático, a combinação desse fator com a utilização de controladores com ação integral causa o ciclo limite no processo, onde a oscilação é mantida até que alguma ação seja tomada. A literatura apresenta diversos métodos para a detecção do agarramento, apesar disso, não existe método aplicável a qualquer tipo de processo que apresente resultado preciso, um dos principais problemas para a aplicação das técnicas é a presença de referência variável no sinal a ser analisado. A referência variável é uma característica comum dentro de processos industriais, principalmente para processos controlados por malha cascata ou que apresentam distúrbios externos. Para a identificação nesses casos, duas alternativas podem ser seguidas: criação de nova metodologia para a identificação do agarramento para sinais com referência variável ou a adaptação das técnicas existentes de modo que essas sejam aplicáveis a esse tipo de sinal, neste trabalho, as duas alternativas foram consideradas. Primeiramente, duas novas técnicas baseadas na forma do sinal foram criadas, a primeira diferencia o sinal pela inclinação dos picos e a segunda pela distribuição dos dados. Posteriormente, foi considerada a adaptação de quatro métodos de detecção já consolidados pela literatura e por suas aplicações industriais. A adaptação dos métodos é basicamente feita através do pré-processamento dos sinais de modo que esses sejam corretamente tratados antes da aplicação das técnicas de detecção. As duas alternativas foram aplicadas a dados simulados e industriais, comprovando a eficiente para a detecção em sinais com referência variável.

Palavras-chave: Controle de processos, agarramento em válvulas de controle, oscilação em processos.

Abstract

Oscillation in control loops is a frequent problem in industrial processes, reaching about 30% of the control loops, among the causes, stiction in control valves have the higher incidence. Stiction is the resistance to movement in the valve stem due to the presence of static friction, the combination of this factor with the use of controller with integral action induces the limit cycle, where the oscillation is sustained until some control action is taken. The literature presents several methods for stiction detecting. However, there is no universal method applicable for all process that produces accurate results. The main problems for the application of the techniques are the presence of variable reference in the signal to be analyzed. The reference variable is a common feature in industrial processes, especially for processes controlled by cascade loop or submitted to external disturbances. For stiction identification in these cases, two choices can be followed: a creation of a new methodology for the identification of stiction for signals with variable reference or the modification of existing techniques so that they could be applied to this type of signal. In this work, the two alternatives were considered. First, two new techniques based on the signal form were created, the first differentiates the signal by the slope of the peaks and the second by data segmentation. Later the adaptation of four detection methods already established in the literature and by its industry applications was considered. The adaptation is done by preprocessing the signals so that they are properly treated before application. The two alternatives were applied to simulated and industrial data, proving to be effective for the stiction detection of signals with variable references.

Keywords: Process control, stiction, process oscillation, performance assessment and diagnosis

“A dúvida não é uma condição agradável, mas a certeza é absurda”.
(Voltaire)

Agradecimentos

Ao amigo Allan Dannenhauer pelas várias horas de ócio produtivo em conversas pelas ruas de Caxias do Sul e pela troca de conhecimento sobre música.

Aos amigos Paulo Evald e Munique Dal Bueno por me receberem em Rio Grande e por todos os bons momentos que passamos juntos. Agradecimentos especiais ao Paulo pelas dicas e sugestões que sempre contribuíram para a minha formação desde a época da graduação.

À Banda Rinits (especialmente ao vocalista Jonnie Primo) por terem me inserido novamente ao meio musical.

À Andreia Axelrud Nunes pela paciência, pela atenção, pelo carinho, por me corrigir e auxiliar em assuntos acadêmicos ou não e por todos os momentos de alegria que passamos juntos, fundamentais para o alívio da tensão causada pelas horas de estudo.

A todos meus professores e ex-professores pela dedicação ao seu trabalho e conhecimento transmitido especialmente aos meus orientadores Dr. Jorge O. Trierweiler e Dr. Marcelo Farenzena pelas sugestões e ajuda prestada durante o desenvolvimento deste trabalho.

A toda minha família, especialmente Casemiro Dambros, Aurora B. Dambros, Ary Vergani (in memoriam), Inélia T. P. Vergani (in memoriam), Adriana Vergani e Fabiano Vergani (in memoriam) por serem a base de tudo o que sou hoje.

Agradeço principalmente meus pais Sergio José Dambros e Maria do Carmo Vergani Dambros pela oportunidade de estudo e suporte que me deram durante toda a vida e por me apoiarem em minhas escolhas e meu irmão Gustavo Vergani Dambros pelo companheirismo e conhecimento compartilhado.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Ferramentas utilizadas	3
1.2 Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Detecção da Oscilação	5
2.2 Agarramento em Válvulas de Controle	7
2.2.1 Modelagem do agarramento.....	7
2.2.2 Detecção do agarramento.....	11
2.2.3 Quantificação do Agarramento	15
2.2.4 Compensação do Agarramento	17
2.2.5 Considerações finais sobre o agarramento em válvulas de controle.....	19
Capítulo 3 – Detecção do Agarramento em Válvulas para Sinais com Referência Variável	21
3.1 Técnicas Propostas	22
3.1.1 Inclinação dos Picos	22
3.1.2 Segmentação em zonas	25
3.2 Estudo de Casos.....	27
3.2.1 Estudo de caso para dados simulados.....	27
3.2.2 Dados de Planta.....	33
3.2.3 Análise para casos especiais.....	36
3.3 Considerações finais.....	40
Capítulo 4 – Pré-processamento de Sinais para o Diagnóstico do Agarramento	43
4.1 Metodologia	45
4.1.1 Remoção do excesso de ruído	45
4.1.2 Detecção de picos e vales, remoção da referência variável e identificação dos zeros.....	47
4.2 Estudo de caso para dados simulados	50
4.2.1 Avaliação do método de detecção por correlação cruzada	53
4.2.2 Avaliação para métodos com fragmentação em meio-ciclos.....	55
4.2.3 Avaliação do método de detecção pelo método de Yamashita.....	59
4.3 Estudo de caso para dados de plantas reais	61
4.3.1 Avaliação do método de detecção por correlação cruzada	62
4.3.2 Avaliação do método de detecção por ajuste de curva	63
4.3.3 Avaliação do método de detecção pelo método das áreas	63
4.3.4 Avaliação do método de detecção para o método de Yamashita.....	64
4.4 Considerações finais.....	65
Capítulo 5 – Aplicação Industrial	67
5.1 Descrição dos dados e discussão preliminar.....	67
5.1.1 Efeito da frequência de amostragem	68
5.1.2 Efeito da compressão dos dados	69
5.2 Avaliação da qualidade do sinal	71
5.2.1 Análise para sinais comprimidos	71
5.2.2 Análise para sinais não comprimidos	72
5.3 Avaliação das técnicas propostas para a detecção do agarramento.....	74
5.3.1 Avaliação para as técnicas de detecção do agarramento para sinais com referência variável.....	76
5.3.2 Avaliação para as técnicas de pré-processamento de dados.....	76
5.4 Considerações finais.....	77
Capítulo 6 – Considerações Finais	79

6.1 Conclusões.....	79
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	81
Referências	83
Apêndice 1: Aplicação dos métodos de inclinação dos picos e segmentação em zonas para dados reais.	89
Apêndice 2: Aplicação da metodologia de pré-processamento de sinais para dados reais.	93
Apêndice 3: Breve Revisão sobre o Processamento Digital de Sinais.....	99
A3.1. Transformada de Fourier.....	99
A3.2. Filtros Digitais	100
A3.3. Função de correlação	101
Apêndice 4: Métodos de compressão de dados do tipo <i>piecewise linear</i>	103
A4.1. Algoritmo Boxcar, Backslope e Boxcar/Backslope.....	103
A3.2. Algoritmo Swinging Door.....	104
Apêndice 5: Quantificação da compressão de dados.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação do cálculo da razão de decaimento da função de autocorrelação para a detecção da oscilação. Fonte: Adaptado de Miao e Seborg (1999).	6
Figura 2.2: Relação entre a saída do controlador (OP) e a posição da haste da válvula (MV) para válvula com agarramento. Gráfico tipicamente conhecido como gráfico de fase ou assinatura da válvula. Adaptado de Jelali e Scali (2010).	10
Figura 2.3: Aplicação do método de Horch para o sinal OP (tracejado) e PV (contínuo). Oscilações causadas por agarramento apresentam função de autocorrelação ímpar; para distúrbios externos, função par. Adaptado de Horch (1999).	11
Figura 2.4: Função densidade de probabilidade da segunda derivada da saída do processo para casos com e sem agarramento. Fonte: Adaptado de Horch e Isaksson (2001).	12
Figura 2.5: Método de Yamashita (2006): (A) classificação do sentido do sinal; (B) combinação para os casos com agarramento.	13
Figura 2.6: Ajuste dos dados para os sinais de padrão triangular e senoidal, seguindo a metodologia de He (2007).	14
Figura 2.7: Comparação da área antes e após o pico do sinal PV para válvula com e sem agarramento. Adaptado de Singhal e Salsbury (2005).	15
Figura 2.8: Método de quantificação do agarramento: (A) por agrupamento de dados em clusters; (B) ajuste de elipse. Adaptado de Choudhury <i>et al.</i> (2006).	16
Figura 2.9: Diagrama para o modelo de Hammerstein.	16
Figura 2.10: Diagrama para o modelo de Wiener.	17
Figura 2.11: Adição de bloco de compensação do agarramento ao sistema.	18
Figura 3.1: Sinal de saída do processo (PV) para medição da vazão em malha controlada por controle do tipo cascata.	21
Figura 3.2: Inclinação para sinais padrão de forma senoidal e triangular.	22
Figura 3.3: Identificação do agarramento para o método de inclinação dos picos: (A) identificação dos picos e vales; (B) avaliação da inclinação para o sinal original; (C) avaliação da inclinação para o sinal padrão senoidal; (D) avaliação da inclinação para o sinal padrão triangular. Dados de Jelali e Scali (2010).	24
Figura 3.4: Segmentação em seis zonas para: (A) sinal padrão senoidal e (B) sinal padrão triangular.	25
Figura 3.5: Identificação do agarramento para o método de segmentação em zonas. Os dados foram segmentados em 6 zonas e a distribuição foi encontrada. Na direita, a distribuição para todo o sinal. Dados de Jelali e Scali (2010).	26
Figura 3.6: Representação do primeiro cenário: malha <i>feedback</i> apenas com agarramento.	27
Figura 3.7: Representação do segundo cenário: malha <i>feedback</i> com adição de distúrbio.	28
Figura 3.8: Representação do terceiro cenário: malha <i>feedback</i> afetada por distúrbios.	29
Figura 3.9: Exemplo de sinal proveniente da terceira simulação onde a presença de referência variável é evidente.	31
Figura 3.10: Representação do quarto cenário: malha cascata afetado por distúrbios.	32
Figura 3.11: Exemplo de sinal da quarta análise onde o método de ajuste de curva não pode ser aplicado diretamente.	33
Figura 3.12: Sinal de saída do controlador (OP), da variável manipulada (PV) e gráfico de fase para dados da primeira válvula.	34
Figura 3.13: Segunda válvula industrial com malha do tipo cascata com agarramento.	34
Figura 3.14: Malha industrial CHEM14 com clara presença de referência variável. Dados emprestados de Jelali e Scali (2010).	35

Figura 3.15: Malha industrial CHEM13 onde o uso de pré-processamento de sinais é requerido para o método de ajuste de curva para a remoção da tendência. Dados fornecidos por Jelali e Scali (2010).	36
Figura 3.16: Sinal proveniente da terceira simulação, onde τ_D foi mantido nulo e o valor dos seguintes parâmetros foi estabelecido: $S = 5$, $J = 3$, $slp1 = 0.005$, $slp2 = -0.01$, $cnp = 0$. Abaixo, exemplo de sinal para a análise da sensibilidade onde ruído branco de variância igual a 0,05 foi adicionado.....	37
Figura 3.17: Espectro de sinal triangular padrão para sinal com 100 dados por ciclo.	37
Figura 3.18: Índice de agarramento em função da variância do ruído para o método de ajuste de curva e para as técnicas propostas: (A) Antes do processamento de dados a (B) após o processamento de dados.....	38
Figura 3.19: Sensibilidade ao ruído para o método de ajuste de curva e para as duas técnicas propostas (onde $S = 5$, $J = 3$, $slp1 = 0.005$, $slp2 = -0.01$, $cnp = 0$).....	39
Figura 3.20: Índice de agarramento para diferentes amostragem: (A) e (B) Análise para o método de inclinação dos picos, respectivamente para os casos com e sem agarramento; (C) e (D) Análise para o método de segmentação em zonas, respectivamente para os casos com e sem agarramento. (onde $S = 5$, $J = 1$, $\tau = 0,2$, $K_p = 0,5$, $\tau_I = 1,66$).....	40
Figura 4.1: Ilustração dos problemas referentes a determinação dos zeros de sinal com ruído e distúrbio.	44
Figura 4.2: Resposta no tempo e em frequência para sinais do tipo senoidal, quadrada, dente de serra e triangular para sinais com 50 dados por ciclo.	45
Figura 4.3: Identificação da frequência de oscilação/corte através da densidade espectral para o sinal com distúrbio elevado.	48
Figura 4.4: Identificação dos picos e vales para um sinal ruidoso de forma quadrada: (A) dados PV são coletados; (B) Sinal suavizado pela utilização de filtro e pontos de inflexão (zeros da segunda derivada) são localizados; (C) Divisão do sinal original em janelas limitadas pelos pontos de inflexão do sinal filtrado; (D) localização dos pontos extremos para cada janela. (dados fornecidos por Jelali e Scali, 2010).....	48
Figura 4.5: Determinação da tendência de sinal afetado por distúrbio.	49
Figura 4.6: Determinação dos zeros para sinal com tendência removida.....	50
Figura 4.7: Procedimento de adição de distúrbio aos sinais OP e PV.....	51
Figura 4.8: Padrões de distúrbio adicionados ao sinal OP e/ou PV para a análise da metodologia proposta.	52
Figura 4.9: Construção do sinal OP a partir do sinal PV para análise pelos métodos de correlação cruzada e de Yamashita.....	52
Figura 4.10: Sinais OP e PV gerados para a análise para o método de Horch, onde o padrão de distúrbio D5 de variância 0.03 foi utilizado.	53
Figura 4.11: Aplicação do método da correlação para sinal sem distúrbio, com distúrbio não utilizando o pré-processamento e com distúrbio utilizando o pré-processamento utilizando o quarto padrão de distúrbio com variância igual a 0,04.....	55
Figura 4.12: Aplicação da metodologia para caso com forte distúrbio e comparação entre a remoção da tendência por ajuste linear e através da metodologia proposta.	56
Figura 4.13: Índice de detecção para o método de ajuste de curva em função do desvio padrão do distúrbio e da variância do ruído utilizando a metodologia proposta para: (A) Processo auto-regulatório sem a pré-filtragem; (B) Com a pré-filtragem; (C) Processo integrador sem a pré-filtragem; (D) Com a pré-filtragem; (E) Sinal seno sem a pré-filtragem; (F) Com a pré-filtragem.....	57

Figura 4.14: Índice de detecção para o método das áreas em função do desvio padrão do sinal de distúrbio e da variância do sinal de ruído utilizando a metodologia proposta para: (A) Processo auto-regulatório sem a pré-filtragem; (B) Com a pré-filtragem; (C) Sinal seno sem a pré-filtragem; (D) Com a pré-filtragem.....	59
Figura 4.15: Índice de detecção para o método de Yamashita em função da amostragem (em dados por ciclo) e da variância do sinal aleatório para os casos: (A) com presença de agarramento e sem remoção do ruído; (B) com agarramento e com remoção do ruído; (C) sem agarramento e sem remoção do ruído; e (D) sem agarramento e com remoção do ruído.....	60
Figura 4.16: Aplicação da metodologia proposta para o pré-processamento de dados para a detecção do agarramento às malhas CHEM1, CHEM15 e CHEM25 (Dados emprestados de Jelali e Scali (2010))	61
Figura 4.17: Correlação cruzada para sinal sem e com pré-processamento para malha CHEM49.	62
Figura 4.18: Malha CHEM13 e CHEM 49 antes e após o pré-processamento. Dados fornecidos por Jelali e Scali (2010).	63
Figura 4.19: Pré-processamento para método das áreas.	64
Figura 4.20: Aplicação da diminuição da amostragem para a malha CHEM23 para posterior aplicação ao método de Yamashita.....	65
Figura 5.1: Exemplo de malha proveniente dos dados fornecidos pela empresa de <i>software</i>	68
Figura 5.2: Efeito do tempo de amostragem sob sinais do tipo triangular, senoidal e quadrado	69
Figura 5.3: Efeito da compressão dos dados em sinais típicos para a análise do agarramento pelos algoritmos <i>Boxcar</i> , <i>Backslope</i> , <i>Boxcar/Backslope</i> e <i>Swinging Door</i> para tolerância ajustada para sinal senoidal com 6 dados.	70
Figura 5.4: Efeito da compressão dos dados em sinais típicos para a análise do agarramento pelos algoritmos <i>Boxcar</i> , <i>Backslope</i> , <i>Boxcar/Backslope</i> e <i>Swinging Door</i> para tolerância ajustada para sinal senoidal com 4 dados.	70
Figura 5.5: Fragmento dos sinais para malhas onde a vazão é a variável controlada.....	72
Figura 5.6: Fragmento dos sinais para malhas onde o nível e a temperatura são as variáveis controladas.....	73
Figura 5.7: Fragmentos escolhidos para a análise do agarramento pela metodologia proposta para as malhas F4, L4 e L5.	75
Figura 5.8: Fluxograma para identificação do agarramento seguindo a metodologia proposta nos Capítulos 3 e 4.	75
Figura 0.1: Filtros digitais: (A) forma direta para o filtro FIR; (B) forma direta para o filtro IIR. Adaptado de Diniz <i>et al.</i> (2004).....	101
Figura A3.1: Demonstração de aplicação dos algoritmos para a compressão de dados <i>Boxcar</i> , <i>Backslope</i> e <i>Boxcar/Backslope</i> (Fonte: Silveira, 2012).....	104
Figura A3.2: Demonstração de aplicação do algoritmo <i>Swinging Door</i> . (Fonte: Silveira, 2012).....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de agarramento para teste de modelo recomendado pela ISA...	11
Tabela 2.2: Padrão do formato do sinal para controle de temperatura, pressão, nível e vazão. Adaptado de Srinivasan <i>et al</i> (2005)	13
Tabela 2.3: Métodos para a quantificação do agarramento baseados no modelo de Hammerstein.	17
Tabela 3.1: Inclinação para o sinal original, triangular e senoidal para os pontos selecionados; média do valor absoluto da inclinação para os pontos selecionados e para todos os pontos dentro do intervalo de avaliação (10^{-3}).	25
Tabela 3.2: Parâmetros utilizados para a primeira análise: sem distúrbio e ruído adicionados.....	28
Tabela 3.3: Percentagem de detecções corretas para a primeira análise.....	28
Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para a segunda análise: distúrbio periódico adicionado ao sinal sem agarramento.	28
Tabela 3.5: Percentagem de detecção corretas para a segunda análise.....	29
Tabela 3.6: Parâmetros para a terceira análise: processo afetado por duas rampas e ruído colorido.....	29
Tabela 3.7: Parâmetros variáveis e respectivos intervalos avaliados na terceira análise: processo afetado por duas rampas e ruído colorido.	30
Tabela 3.9: Parâmetros para a quarta análise: malha cascata afetada por duas rampas e ruído colorido	32
Tabela 3.10: Percentagem de detecção corretas para a quarta análise.	33
Tabela 3.11: Eficiência dos métodos propostos para dados industriais fornecidos por Jelali e Scali (2010).....	35
Tabela 3.12: Índice de agarramento para o método de ajuste e as técnicas propostas para diferentes frequências de corte	38
Tabela 3.13: Porcentagem de identificação correta para processos integradores.	39
Tabela 4.1: Problemas e soluções adotadas para o pré-processamento de dados em métodos convencionais de detecção do agarramento.	43
Tabela 4.2: Índice de agarramento para método de ajuste de curvas em função do número de harmônicos para sinal triangular.	46
Tabela 4.3: Índice de agarramento para método de ajuste de curvas em função do número de harmônicos para sinal do tipo dente de serra.....	46
Tabela 4.4: Índice de agarramento para método relé em função do número de harmônicos para sinal do tipo onda quadrada.	46
Tabela 4.5: Variação do índice de agarramento para o método das correlações cruzadas utilizando a metodologia proposta para a remoção da referência variável.	54
Tabela 4.6: Comparação do resultado para diferentes tipos de pré-processamento para o método de ajuste de curvas.	56
Tabela 4.7: Comparação do resultado para diferentes tipos de pré-processamento para o método das áreas.	58
Tabela 5.1: Verificação da qualidade dos sinais comprimidos e reconstruídos. Os pontos por ciclo foram obtidos por inspeção visual em diferentes fragmentos, o valor apresentado foi o maior encontrado.	71
Tabela 5.2: Verificação da qualidade dos sinais para o novo conjunto de dados.	74
Tabela 5.3: Identificação do agarramento para o método de ajuste de curva e métodos propostos. Onde “Inc” é a presença incerta do agarramento devido a problemas com a aplicação da técnica de detecção.....	76

Tabela 5.4: Identificação do agarramento para os métodos de correlação cruzada, áreas, ajuste de curva e Yamashita após a aplicação da metodologia 76

ABREVIATÖES

ARM	<i>Autoregressive model with external input</i>
ARMA	<i>Autoregressive–moving-average model</i>
ARMAX	<i>Autoregressive–moving-average model with external input</i>
C	Bloco do controlador
CSV	<i>Comma-separated values</i>
DCT	Transformada discreta de cosseno
DSP	Processamento digital de sinais
EMD	<i>Empirical mode decomposition</i>
FFT	Transformada rápida de Fourier
FIR	Filtros de resposta ao impulso de duração finita
G	Bloco da função de transferência da planta
IAE	Integral absoluta do erro
ICA	<i>Independent component analysis</i>
IIR	Filtros com resposta ao impulso de duração infinita
IMF	<i>Intrinsic mode function</i>
PDF	Função densidade de probabilidade
PI	Controlador proporcional-integral
S	Bloco do agarramento
SISO	Sistema <i>Single-input single-output</i>

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

cnp	Força do ruído branco
d	Largura da banda causada pelo agarramento
D_{per}	Período do distúrbio
DV	Sinal do distúrbio externo
F_a	Força aplicada ao atuador da válvula
f_d	Força de atrito dinâmico
F_e	Força atuante na válvula
F_f	Força de fricção entre as partes da válvula
F_i	Força extra requerida para o encaixe na sede
F_p	Força causada pela queda de pressão do fluido escondo através da válvula
F_s	Força da mola em válvula pneumática
f_s	Força de atrito estático
J	Tamanho do salto na posição da válvula
Kp	Ganho do controlador
M	Massa das partes moveis da válvula
MV	Posição da haste da válvula
OP	Sinal de saída do controlador
PV	Variável de processo
S	Amplitude do sinal de entrada para válvula estática
Si_{sl}	Índice de agarramento para método de inclinação dos picos
Si_{zn}	Índice de agarramento para método de segmentação em zonas
Slp	Inclinação da rampa para distúrbio
SP	<i>Set-point</i>
T_s	Tempo de amostragem
W_c	Frequência de corte de filtro
w_{osc}	Frequência de oscilação de sinal
X	Posição da haste da válvula
δ	Limiar para o método das áreas
$\Delta\delta$	Índice de agarramento para o método das correlações cruzadas relacionado à amplitude
$\Delta\tau$	Índice de agarramento para o método das correlações cruzadas relacionado ao deslocamento

σ	Tempo morto
τ	Constante de tempo do processo
τ_i	Ação integral do controlador
τ_d	Constante de tempo do distúrbio

Capítulo 1 – Introdução

Oscilações em processos industriais têm recebido grande atenção por pesquisadores devido à variabilidade causada no sistema e sua grande incidência, aproximadamente: 30% das malhas controladas por válvulas, segundo Bialkowski (1992). A oscilação pode se propagar de uma para todas as malhas de uma unidade e causar mudança nas condições de operação, perdas de energia, redução na qualidade do produto, aumento na taxa de rejeição e desgaste excessivo da haste da válvula (Choudhury *et al.*, 2006). Existem muitas causas para a oscilação, incluindo: má sintonia do controlador, mau funcionamento de sensores ou atuadores, projeto inadequado do processo, distúrbios externos e a presença de fricção nos atuadores. Entre essas, a mais comum é a fricção, responsável por 20% a 30% dos casos de oscilação (Paulonis e Cox, 2003).

A fricção entre a haste e o parafuso da válvula, amplamente conhecida como agarramento (ou *stiction*, em inglês), impede o movimento suave de abertura e fechamento da válvula. O agarramento ocorre quando a válvula com fricção para ou muda de direção, assim, para retomar o movimento, o atuador necessita de uma força maior que a usual para vencer o atrito estático. Depois de vencido, a energia armazenada é liberada abruptamente na forma de energia cinética, causando o salto na posição da válvula. Se a energia armazenada é superior à necessária para colocar a válvula na posição desejada, a direção de atuação é invertida e a válvula agarra novamente. A repetição contínua deste fenômeno causa o ciclo limite, fazendo com que a posição da haste da válvula varie entre duas posições, acima e abaixo da posição desejada.

Como a fricção é uma propriedade inerente entre duas superfícies em contato, o agarramento está sempre presente em válvulas de controle. A fricção em válvulas novas e bem reguladas normalmente é muito pequena e não causa problemas de controle, mas com a degradação da sede, perda da lubrificação, penetração de materiais estranhos e devido ao encaixe justo entre a haste e o parafuso da válvula, a fricção torna-se elevada e o ciclo limite surge em controles do tipo PI (proporcional-integral), onde o *offset* deve ser sempre compensado. O ciclo limite causado pelo agarramento possui características diferentes dos causados por outras fontes. Para o agarramento, a velocidade da haste da válvula é mantida nula por um período de tempo, enquanto que para as demais fontes, o comportamento do ciclo limite normalmente é senoidal (Brásio *et al.*, 2014a). Os sinais de saída do processo (PV), da variável manipulada (MV) e de saída do controlador (OP) para

malhas que apresentam válvulas com agarramento possuem padrões bem definidos dependendo da dinâmica do processo, do nível de agarramento e dos parâmetros do controlador e possuem normalmente forma triangular ou quadrada. A identificação desses padrões é utilizada pela maioria dos métodos de detecção do agarramento existentes.

Apesar do grande número de métodos de detecção, Jelali e Scali (2010) e Horch (2007) afirmam que não existe técnica que identifique corretamente o agarramento para qualquer circunstância. Mesmo com padrões bem definidos, o sinal pode ser distorcido pela presença de distúrbios externos, ruído e a presença de outros problemas na malha ou válvula, como histerese e banda morta, dessa forma o método ideal para cada circunstância deve ser escolhido cuidadosamente pelo usuário, o que torna o processo de diagnóstico não automático. Além disso, os métodos existentes não são eficientes para casos onde o valor de referência é variável, comum para aplicações industriais, onde o processo está sujeito a distúrbios externos ou a *setpoint* variável, como para controles do tipo cascata, por exemplo. A Figura 1.1 mostra um sinal com clara presença de agarramento. À esquerda, sinal sem a presença de distúrbios externos e ruído possui referência fixa, ou seja, a oscilação ocorre centrada em um eixo horizontal constante (nesse caso, a linha do zero), para sinais desse tipo, o agarramento é facilmente detectado por técnicas convencionais. À direita, a presença de distúrbio torna a referência do sinal variável, a aplicação de métodos convencionais ocasionaria erro ou resultado incorreto.

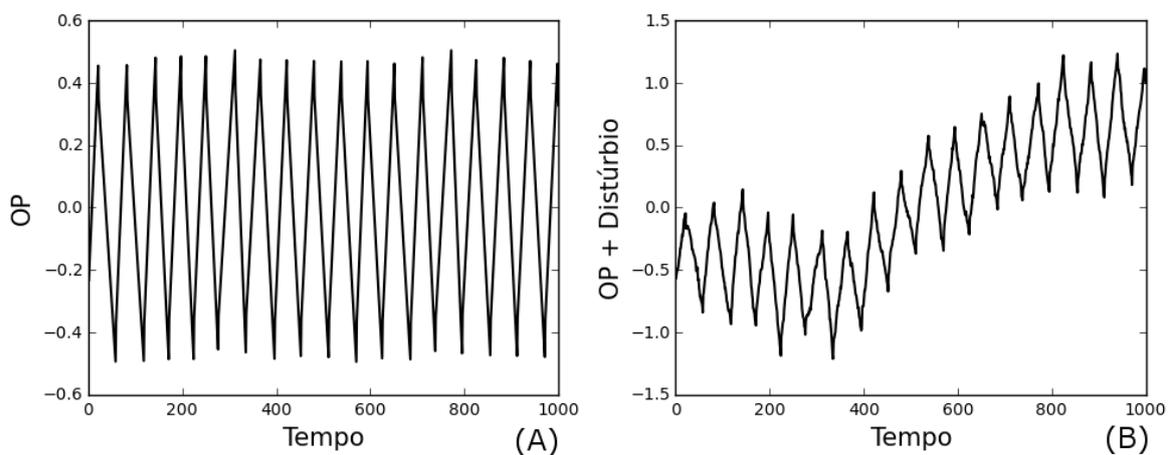


Figura 1.1: Sinal indicando clara presença de agarramento: (A) sinal sem a presença de distúrbio; (B) sinal com a presença de distúrbio.

Sinais provenientes de medições industriais são normalmente corrompidos pela presença de ruído e distúrbios externos. O pré-processamento dos dados é requisito básico para grande parte dos métodos de detecção, mas, ao mesmo tempo, a utilização deve ser restringida de modo a não haver suavização excessiva do sinal e, conseqüentemente, a perda dos padrões característicos do agarramento. A literatura não apresenta estudos sobre o adequado pré-processamento de dados para a detecção do agarramento. Muitos estudos apenas sugerem o uso do filtro, o tipo e os parâmetros devem ser escolhidos pelo usuário manualmente de acordo com o grau do ruído e as características do processo, o que, novamente, dificulta a implementação de métodos de detecção automáticos. Além disso, se corretamente aplicado, o pré-processamento de sinais pode ser utilizado para a remoção da referência variável, tornando o sinal propício a aplicação de métodos convencionais de detecção do agarramento.

O presente trabalho tem como objetivos a criação de nova metodologia para a detecção do agarramento em válvulas de controle para sinais de referência variável, assim como a criação de técnicas para o pré-processamento de dados para a adaptação de métodos de detecção já existentes. Por fim, o trabalho também avalia uma série de questões relacionadas às novas implementações, tais como:

- Verificar a eficiência das técnicas criadas em relação a métodos de detecção já existentes;
- Verificar a aplicabilidade da técnica para casos com a presença de ruído, tempo morto e processos integradores;
- Criar metodologia com o cuidado de afetar o mínimo possível o sinal em estudo, de modo a não prejudicar a identificação do agarramento;
- Aplicar toda a metodologia a casos industriais reais.

1.1 Ferramentas utilizadas

Através dos objetivos deste trabalho, existe a necessidade de escolha de ferramentas ideais para a sua elaboração. Sendo grande parte do trabalho baseado em modelagem e simulação computacional a escolha de uma linguagem de programação com ampla disponibilidade de ferramentas matemáticas é essencial.

A linguagem de programação Python é uma linguagem aberta, interpretada, orientada a objeto, que, apesar de não possuir a velocidade de processamento de linguagens compiladas como C/C++ e Fortran, prevalece por ser de fácil escrita, simples aprendizagem, portátil (executável em várias plataformas) e por contar com ampla comunidade de usuários.

Python sofre constante ascensão desde sua criação em 1991, sua utilização é praticamente ilimitada abrangendo tarefas como: criação de interface gráfica, redes, base de dados e jogos, processamento de imagens, entre outras. Para a computação científica, bibliotecas como Numpy e Scipy facilitam tarefas que envolvem vetores e matrizes além de apresentarem módulos para diversas operações nas áreas de álgebra linear, otimização, transformadas de Fourier e processamentos de sinais e possuir ferramentas para a integração com módulos em C/C++ e Fortran. Python é uma alternativa potente e gratuita para *softwares* proprietários como Matlab e Maple, desta forma, a linguagem vem sendo explorada por projetos e empresas de grande reputação científica como NASA, Los Alamos, Fermilab e JPL.

Além da linguagem Python e das bibliotecas Numpy e Scipy, este trabalho utiliza a bibliotecas Matplotlib para a criação de gráficos e imagens. Este trabalho utiliza ainda os *softwares* Matlab/Simulink para a simulação de malhas de controle, GIMP para a edição de imagens e DIA para a criação de fluxogramas e diagramas.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. O capítulo 1 apresenta os aspectos gerais do trabalho, juntamente com seus objetivos e motivações. No capítulo 2, a revisão de trabalhos relacionados a modelos, quantificação, detecção e compensação do agarramento, assim como trabalhos sobre a detecção da oscilação é apresentada.

O terceiro capítulo apresenta duas novas técnicas de detecção do agarramento para sinais de referência variável baseados na identificação da forma do sinal, o primeiro pela inclinação dos picos do sinal e a segunda pela distribuição dos dados. No capítulo 4 é feita a avaliação dos métodos de pré-processamento de sinais para a análise do agarramento assim como a proposta de uma nova metodologia baseada na identificação da frequência de oscilação do sinal.

O quinto capítulo apresenta a aplicação das metodologias propostas a dados provenientes de uma unidade de hidrotreatamento de uma refinaria. O capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

A literatura apresenta centenas de trabalhos relacionados ao agarramento em válvulas de controle, que por sua vez, dependem de centenas de outros trabalhos e métodos matemáticos. Deste modo, o presente capítulo pretende revisar os estudos mais relevantes envolvidos nesta dissertação, tanto os relacionados ao agarramento quanto os relacionados à detecção da oscilação.

A seção 2.1 trata dos principais métodos de detecção da oscilação, requisito fundamental para a análise do agarramento. A seção 2.2 apresenta a revisão dos modelos, métodos de detecção, quantificação, compensação do agarramento e termina com algumas considerações finais.

2.1 Detecção da Oscilação

A análise da oscilação em uma malha de controle é conduzida em dois passos: primeiro é feita a detecção da oscilação e após, caso a oscilação seja confirmada, o diagnóstico da causa (Srinivasan *et al.*, 2007). Entre as causas da oscilação, as mais frequentes são: má sintonia do controlador, falha no sensor ou atuador, distúrbios externos e a presença de atrito nos atuadores. Sendo a oscilação da malha uma propriedade intrínseca de sistemas com agarramento, a detecção da oscilação deve ser conduzida antes da análise do agarramento.

Nas últimas duas décadas, uma grande quantidade de métodos para a detecção automática da oscilação foi apresentada. O primeiro, proposto por Hägglund (1995), baseia-se no cálculo da integral absoluta do erro (IAE) entre sucessivos cruzamentos do zero no sinal do erro do controlador (diferença entre o *setpoint* e a variável controlada). Valores altos do IAE correspondem a longos períodos sem o sinal cruzar o zero, que, por sua vez, caracterizam a oscilação do sistema; valores baixos são causados pelo ruído. Thornhill e Hägglund (1997) propuseram uma correção do método original de Hägglund onde, além da IAE do sinal, a regularidade da oscilação é avaliada.

Miao e Seborg (1999) propuseram um método baseado no cálculo da taxa de decaimento da função de autocorrelação do sinal (ilustrada pela Figura 2.1), onde o parâmetro b é a distância entre o primeiro vale e a reta que intercepta os dois primeiros

picos, a é a distância entre o segundo pico e a reta que intercepta os dois primeiros vales. A partir desses valores a taxa de decaimento R é calculada sendo a razão entre a e b , para valores de R acima de 0,5, conclui-se que o sinal é excessivamente oscilatório. A vantagem desse método, segundo os próprios autores, está na redução do efeito do ruído, já que a função de autocorrelação teoricamente não é afetada pelo ruído branco.

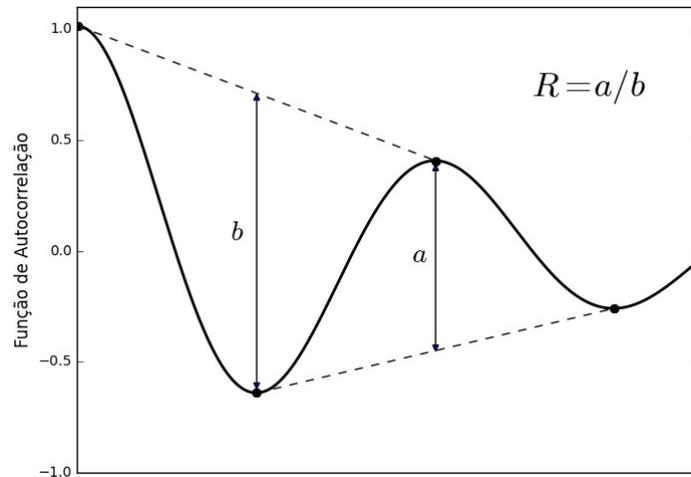


Figura 2.1: Representação do cálculo da razão de decaimento da função de autocorrelação para a detecção da oscilação. Fonte: Adaptado de Miao e Seborg (1999).

O trabalho de Thornhill *et al.* (2003) apresenta um método baseado no cruzamento do zero da função de autocovariância, sendo que a oscilação é constatada quando o desvio padrão do período de oscilação é menor que um terço da média desse período. Para o método, o sinal é oscilatório apenas quando as oscilações são regulares, de modo a avaliar sinais com múltiplas causas de oscilação, esses são fragmentados de acordo com a frequência de oscilação e cada fragmento é avaliado separadamente.

Srinivasan *et al.* (2007) propuseram um método baseado na EMD (*Empirical mode decomposition*), onde o sinal é decomposto em várias funções do tipo IMF (*intrinsic mode function*), que são avaliadas separadamente. O método envolve “envelopar” os dados usando duas interpolações do tipo *spline* cúbica, uma para os pontos de máximo e outra para os pontos de mínimo; obter a média entre o envelope superior e inferior, que é a média variável do sinal; subtrair a média variável do sinal original, criando a função IMF; subtrair do sinal original o IMF encontrada, obtendo o resíduo. O procedimento é repetido até que todas as funções IMF sejam extraídas do sinal original. Após isso, as IMF são avaliadas pelo método proposto por Miao e Seborg (1999). A oscilação no sinal é identificada caso o resultado para a oscilação pelo método de Miao e Seborg em qualquer função IMF seja positivo.

Partindo do princípio que os métodos anteriores necessitam da implementação manual de filtros ou a especificação individual da tolerância para sinais ruidosos, com distúrbio ou com oscilação lenta, Li *et al.* (2010) propuseram um método baseado no transformada discreta de cosseno (DCT) com o objetivo de isolar componentes por diferentes frequências e analisá-los separadamente.

Além destes, vários outros trabalhos foram publicados, como:

- Forsman e Stattin (1999) – Baseado na periodicidade e magnitude do valor da IAE. Segundo os autores, o método possui como vantagens a identificação para oscilação irregulares, assimétricas e de diferentes frequências;
- Salsbury e Singhal (2005) – Utilizam a identificação de modelo do tipo ARMA (*auto-regressive and moving-average*) para a identificação dos polos não amortecidos para a detecção online da oscilação;
- Xia *et al.* (2005) – Decomposição do sinal utilizando a técnica ICA (*independent component analysis*), utilizado para malhas que possam apresentar mais de uma causa de oscilação. O método calcula dois índices, o primeiro para indicar a magnitude do ruído e o segundo, o índice de significância que relaciona a fonte de oscilação a uma localização na planta;
- Jiang *et al.* (2007) – Baseado no envelopamento do espectro. O método possui como vantagens a não necessidade por um número mínimo de ciclos e a simples automatização do uso de filtros.
- Tikkala *et al.* (2014) – Detecção de oscilação para sinais de referência variável baseado em propriedades estatísticas de dados do cruzamento com a linha zero. Para isso, primeiramente a tendência não estacionária é removida do sinal para então ser aplicada a metodologia de detecção da oscilação.

A avaliação e comparação dos métodos de detecção de oscilação podem ser encontradas nos trabalhos de Thornhill e Horch (2007) e Choudhury (2008b).

2.2 Agarramento em Válvulas de Controle

Estudos relacionados ao agarramento em válvulas de controle são divididos em quatro áreas: modelagem, detecção, quantificação e compensação, cada qual apresenta um grande número de estudos e metodologias disponíveis na literatura.

2.2.1 Modelagem do agarramento

Entre as várias causas de variabilidade no sistema, a mais difícil de modelar é o agarramento (Garcia, 2008). Modelos do agarramento podem ser necessários por vários motivos, por exemplo, simular o comportamento do agarramento ou mesmo quantificar e compensar esse problema. Basicamente, existem dois grandes grupos de modelos: fenomenológicos e baseados em dados.

Modelagem Fenomenológica

Modelos fenomenológicos são baseados em conceitos físicos, nesse caso, na segunda lei de Newton. O modelo resumido para a válvula com agarramento é apresentado pela equação 2.1.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \sum \text{Forças} = F_a + F_s + F_f + F_p + F_i \quad (2.1)$$

onde m é a massa das partes móveis da válvula; x é a posição da haste, F_a a força aplicada ao atuador, F_s a força da mola, F_p é a força causada pela queda de pressão do fluido

escoando através da válvula; e F_i a força extra requerida para o encaixe na sede. Segundo Choudhury *et al.* (2004b) as contribuições de F_p e F_i são desprezíveis e podem ser desconsideradas.

A diferença entre os modelos físicos está no cálculo da força de fricção (F_f), e, segundo Olsson (1996), são divididos em modelos estáticos (a força de atrito é modelada como uma função estática da velocidade) e modelos dinâmicos (os parâmetros variam com o tempo). O modelo mais comum, então chamado modelo clássico, é descrito pelo conjunto de Equações 2.2:

$$F_f = \begin{cases} F_f(v) & \text{se } v \neq 0, \\ F_e & \text{se } v = 0 \text{ e } |F_e| \leq F_s, \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e) & \text{se } v = 0 \text{ e } |F_e| > F_s, \end{cases} \quad (2.2)$$

onde, F_e é a força atuante na válvula, ou seja, a soma entre F_a e F_s . A primeira linha da equação refere-se ao caso onde a haste está se movendo; a segunda, quando a haste está parada e a terceira, momentos antes de retomar o movimento. O problema do modelo clássico é a consideração da velocidade nula, já que em uma simulação o valor exato de $v = 0$ nunca será atingido (Garcia, 2008). Esse problema é resolvido em outros modelos físicos, que não serão apresentados, pois fogem do escopo deste trabalho, mas cabe ressaltar o trabalho pioneiro de Karnopp (1985), amplamente citado e utilizado na literatura como Choudhury *et al.* (2004b) e Garcia (2008).

Modelagem baseada em dados

Além da maior demanda computacional decorrente da resolução de sistema de equações diferenciais, os modelos físicos detalhados necessitam de grande número de parâmetros (área do diafragma, pressão do ar, constante da mola, por exemplo), sendo que alguns deles são dificilmente estimados. Modelos baseados em dados, por outro lado, utilizam normalmente um ou dois parâmetros para descrever o agarramento, tornando-os mais simples e rápidos (Garcia, 2008). Graças a estas propriedades, a literatura técnica atual é basicamente composta de modelos desse tipo.

O primeiro modelo do tipo baseado em dados (ou *data-driven*, em inglês) foi apresentado por Stenman *et al.* (2003). Este modelo descreve o salto na posição da haste quando a força aplicada sobre a haste supera a força causada pelo atrito estático como apresentado pela Equação 2.3.

$$x(t) = \begin{cases} x(t-1) & \text{if } |u(t) - x(t-1)| \leq d, \\ u(t) & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2.3)$$

onde $x(t)$ corresponde à posição da haste da válvula, $u(t)$ ao sinal de saída do controlador e d à largura da banda causada pelo agarramento.

Considerando que um parâmetro não é suficiente para descrever o comportamento do agarramento, Choudhury *et al.* (2004a) apresentaram um novo modelo utilizando os parâmetros S (amplitude do sinal de entrada durante o tempo em que a haste se encontra presa) e J (tamanho do salto).

O modelo de Choudhury é incapaz de lidar precisamente com sinais estocásticos, à vista disso, Kano *et al.* (2004) propuseram uma nova metodologia, eliminando esse problema. O modelo utiliza os mesmos parâmetros de Choudhury S e J , mas os relaciona com propriedades físicas conforme as equações 2.4 e 2.5

$$J = f_s - f_d \quad (2.4)$$

$$S = f_s + f_d \quad (2.5)$$

onde f_s é a força de atrito estático e f_d a força de atrito dinâmico.

De modo a criar um modelo simplificado para o agarramento He *et al.* (2007) propuseram um novo método, para isso foi criada uma variável temporária que corresponde ao acúmulo de energia na haste da válvula. O modelo utiliza as variáveis f_s e f_d , aproximando-se desse modo de modelos físicos.

Esses três últimos modelos são amplamente utilizados na literatura e descrevem o comportamento típico da válvula com agarramento (Figura 2.2) obedecendo as seguintes etapas:

- Estagnação - Quando a haste da válvula muda de direção, a válvula agarra (pontos M e G). A posição da válvula permanecerá a mesma até que a energia armazenada no atuador seja superior à força de atrito estático. Da mesma forma, a válvula agarra sem a mudança da direção se a velocidade de movimentação da haste é reduzida (Pontos D e J);
- Salto - Após vencer a força de atrito estático, a energia potencial armazenada é convertida em energia cinética, causando uma mudança abrupta na posição da haste (segmentos BC, EF, HI e KL);
- Movimento - Após o salto, a válvula continua a se mover (segmentos CD, FG, IJ, LM) até novamente mudar de direção ou ter sua velocidade reduzida.

Avaliação dos modelos de agarramento

A avaliação dos modelos é feita através dos testes recomendados pela ISA (2006). A avaliação é composta pela aplicação de cinco sinais de saída do controlador (OP) a modelos de válvulas com parâmetros do agarramento, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de agarramento para teste de modelo recomendado pela ISA

Válvula	Pouco atrito	Médio atrito	Alto atrito
S	0,0167	0,5804	0,9224
J	0,0000	0,0550	0,0860

No trabalho de Garcia *et al.* (2008) o modelo físico de Karnopp (1985), e os modelos do tipo *data-driven* de Stenman *et al.* (2003), Choudhury *et al.* (2004a), Kano *et al.* (2004) e He *et al.* (2007) foram implementados e submetidos ao teste ISA. Os modelos de Karnopp e Kano foram os únicos que representaram idealmente o comportamento de uma válvula com agarramento. Xie *et al.* (2013) e Li *et al.* (2015), em seus respectivos trabalhos, aplicaram os próprios modelos ao teste ISA e comprovaram sua eficiência.

2.2.2 Detecção do agarramento

O agarramento pode ser facilmente identificado através de métodos invasivos, mas a aplicação desses métodos em uma planta com centenas ou mesmo milhares de válvulas não é viável nem rentável (Choudhury *et al.*, 2006). Conseqüentemente, métodos não-invasivos são de extrema importância para a identificação do agarramento.

Criado por Horch (1999), o primeiro método de detecção não-invasivo baseia-se na correlação cruzada entre o sinal de entrada da válvula (OP) e o saída do processo (PV). Se o resultado é uma função ímpar, a oscilação é causada pelo agarramento; se par, por distúrbios externos ou malha instável, a Figura 2.3 apresenta um exemplo para os dois casos. Como principal desvantagem, esse método é aplicável apenas a sistemas com flutuação periódica, para processos do tipo integradores e controladores do tipo PI.

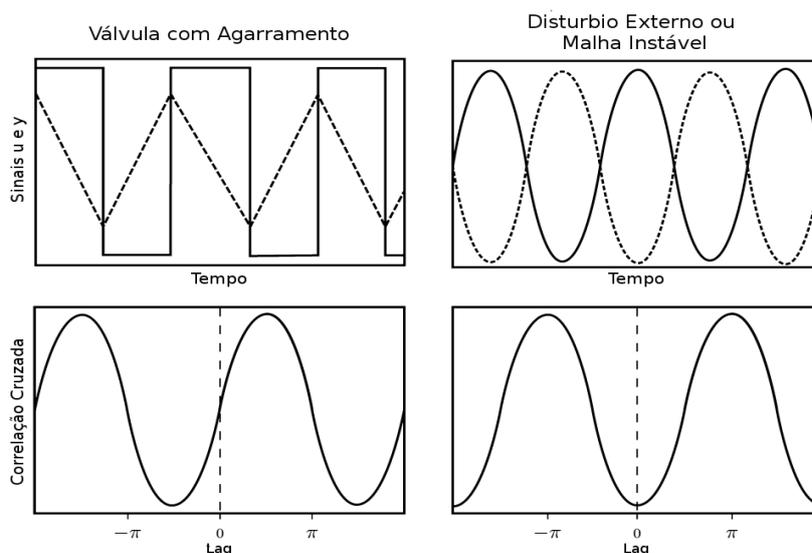


Figura 2.3: Aplicação do método de Horch para o sinal OP (tracejado) e PV (contínuo). Oscilações causadas por agarramento apresentam função de autocorrelação ímpar; para distúrbios externos, função par. Adaptado de Horch (1999).

Em trabalho posterior, Horch e Isaksson (2001) utilizaram a função densidade de probabilidade (PDF) da segunda derivada da saída do processo: se o histograma resulta em distribuição Gaussiana, a válvula possui agarramento; se apresenta dois máximos, a oscilação é causada por fatores externos, como ilustrado pela Figura 2.4, onde y corresponde ao sinal de saída do processo (PV). O método provou ser eficiente para processos do tipo integradores, mas devido à utilização da segunda derivada, o ruído presente no sinal é amplificado, dessa forma a utilização de filtro do tipo passa-baixa é necessário.

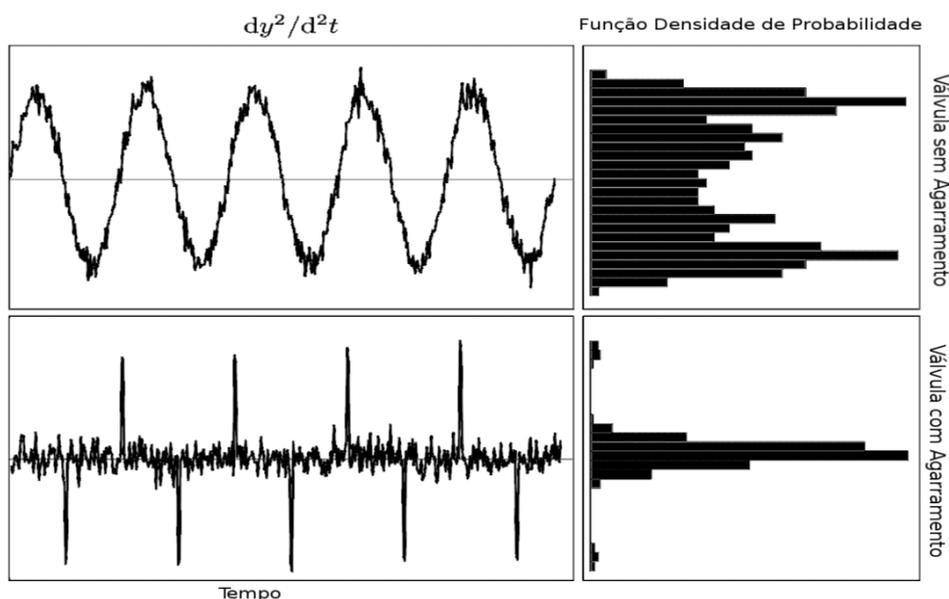


Figura 2.4: Função densidade de probabilidade da segunda derivada da saída do processo para casos com e sem agarramento. Fonte: Adaptado de Horch e Isaksson (2001).

Baseado na identificação do padrão MV(OP) (Figura 2.2), vários métodos foram propostos. No método de Yamashita (2006), os sentidos de MV e OP são classificados em I (ascendente), D (descendente) ou S (estável). O método avalia 16 combinações possíveis de sentidos, onde 4 são características de válvulas com agarramento, deste modo, o agarramento é confirmado quando mais de 25% das combinações são aquelas que caracterizam o agarramento. A Figura 2.5 ilustra os sentidos possíveis para o gráfico de fase e as combinações características para sinais de válvulas com agarramento. Posteriormente, Scali e Ghelardoni (2008) corrigiram o método de Yamashita adicionando outros três padrões de agarramento encontrado principalmente em refinarias.

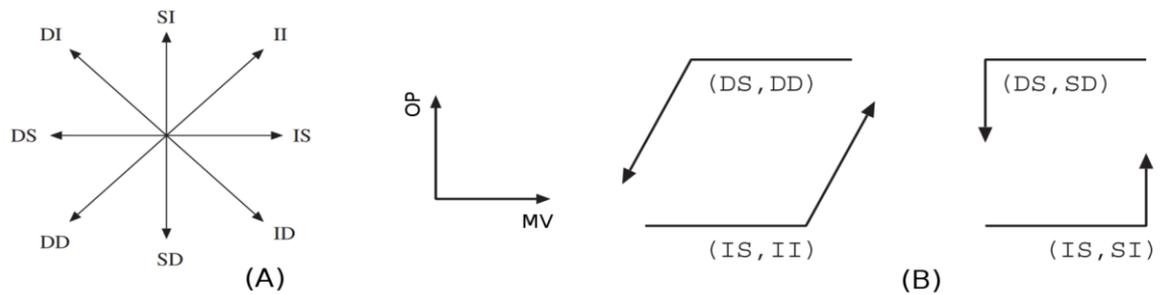


Figura 2.5: Método de Yamashita (2006): (A) classificação do sentido do sinal; (B) combinação para os casos com agarramento.

Métodos baseados no padrão MV(OP) são precisos, mas possuem aplicação restrita devido à necessidade de dados relacionados à posição da válvula (raramente disponíveis). A aplicação pode ser aproximada para processos de dinâmica rápida, como é o caso de malhas onde a vazão é controlada. Além disso, existe uma expectativa de aumento na aplicação deste tipo de método com o aumento do uso de válvulas inteligentes (Jelali e Huang, 2010).

O agarramento provoca a não-linearidade no processo, assim Choudhury *et al.* (2006) propuseram um método de detecção da não-linearidade utilizando estatística de alta ordem (HOS). Existem outras possíveis causas para a não-linearidade na malha de controle, que podem estar relacionadas com não linearidades da própria planta, com o tipo de obturador utilizado na válvula ou com a presença de banda morta, dessa maneira, este método não necessariamente identifica o agarramento, mas sim a não linearidade da malha.

Por fim, grande parte dos métodos de detecção do agarramento são baseados na identificação do padrão dos dados de saída do controlador (OP) ou da variável controlada (PV). A forma do sinal para válvulas com agarramento depende do tipo de controlador e da dinâmica do processo e basicamente segue o padrão especificado por Srinivasan (2005) e apresentado na Tabela 2.2. Para as demais causas de oscilação no processo, os sinais possuem tipicamente forma senoidal.

Tabela 2.2: Padrão do formato do sinal para controle de temperatura, pressão, nível e vazão. Adaptado de Srinivasan *et al* (2005)

Variável Avaliada	Dinâmica Rápida		Dinâmica Lenta	Sistema Integrado	
	Ação Integral Dominante	Ação Proporcional Dominante	Pressão e Temperatura	Nível	Nível com Controle PI
OP	Triangular	Retangular	Triangular	Triangular	Triangular
PV	Quadrada	Retangular	Senoidal	Triangular	Parabólica

O método relé, desenvolvido por Rossi e Scali (2005) propõem a divisão do sinal do erro do controlador em meio-ciclos. Cada segmento é ajustado a três tipos de curva: senoidal, triangular e relé (aproximação para ondas quadradas). Os valores para o mínimo erro quadrado de cada ajuste são obtidos e o índice do agarramento é calculado de acordo com a Equação 2.6.

$$S_I = \frac{E_S - E_{RT}}{E_S + E_{RT}} \quad (2.6)$$

onde E_S é o erro para função seno e E_{RT} é o erro para o melhor ajuste entre a função triangular e quadrada. Valores de índice positivos indicam a presença de agarramento, índices negativos, outra causa de oscilação.

Diferente do método anterior que busca avaliar apenas o sinal PV, a metodologia descrita por He *et al.* (2007) afirma que para o caso de agarramento em processos autorregulatórios a forma triangular é observada no sinal OP, enquanto que para processos integradores, no sinal PV, caso não exista agarramento, a forma senoidal é observada em ambos os sinais. Assim, apenas o ajuste triangular é necessário para a identificação do agarramento, eliminando a necessidade do ajuste da função relé, um dos problemas do método de Rossi. O índice do agarramento é calculado de acordo com a Equação 2.7.

$$SI = \frac{MSE_{Sin}}{MSE_{Sin} + MSE_{Tri}} \quad (2.7)$$

onde MSE_{Sin} e MSE_{Tri} são respectivamente o mínimo erro quadrado para ajuste senoidal e triangular. Para valores de índice acima de 0,6, o agarramento é confirmado, para valores abaixo de 0,4, a oscilação tem outra causa, a faixa intermediária indica área de incerteza. A Figura 2.6 mostra o ajuste feito de acordo com o método de He para processo do tipo autorregulatórios.

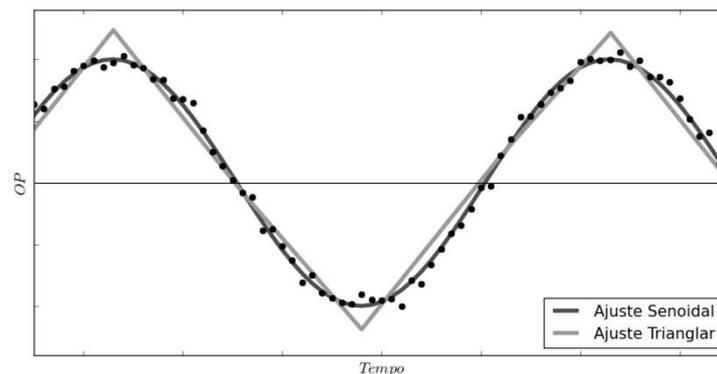


Figura 2.6: Ajuste dos dados para os sinais de padrão triangular e senoidal, seguindo a metodologia de He (2007).

Singhal e Salsbury (2005) propuseram um método de detecção que relaciona a área antes e após cada pico no sinal do erro do controlador (como ilustrado na Figura 2.7), o parâmetro R é calculada pela Equação 2.8.

$$R = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.8)$$

onde A_1 é a área anterior a um pico ou vale e A_2 é a área posterior. Para $R > 1$, a válvula apresenta agarramento; para $R \approx 1$, a causa da oscilação é o controle agressivo.

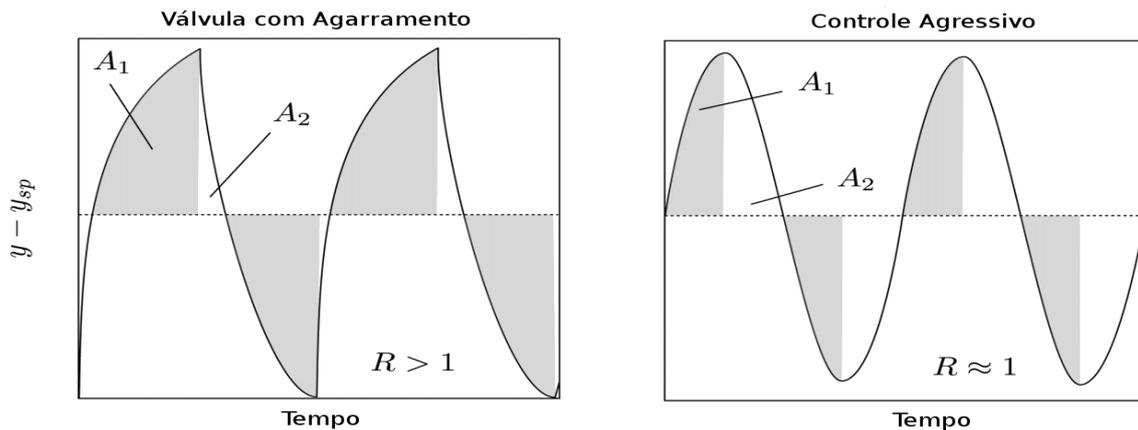


Figura 2.7: Comparação da área antes e após o pico do sinal PV para válvula com e sem agarramento. Adaptado de Singhal e Salsbury (2005).

Alguns outros trabalhos publicados sobre a detecção do agarramento são:

- Thornhill (2005) aborda a detecção da não linearidade baseado na análise da fase do espectro;
- Kano *et al.* (2004) apresentaram duas técnicas: detecção de mudança no sinal OP não seguidas de mudanças em PV, detecção do paralelogramo no gráfico de fase, no caso de não haver informações sobre a posição da haste da válvula, a detecção é feita para o gráfico PV(OP) se o processo possui dinâmica rápida;
- Stenman *et al.* (2003) empregaram a detecção de mudanças abruptas (salto) na variável de processo;
- Farenzena e Trierweiler (2012) estudaram a distinção do agarramento e *backlash* em plantas do tipo integradoras;

Métodos de detecção do agarramento são extensivamente analisados nos trabalhos de Horch (2007) e Jelali e Scali (2010). Ambos os trabalhos concluem que apesar do grande número de técnicas de detecção, não existe um único método eficiente para todos os casos de processos, por consequência é necessária a interação do usuário na escolha do método adequado.

2.2.3 Quantificação do Agarramento

Independente das condições, a resistência ao movimento entre duas superfícies sempre existe, assim, todas as válvulas apresentam certo grau de agarramento. Algumas podem se encontrar em um grau aceitável, outras devem ser submetidas imediatamente à manutenção. Assim, a quantificação do agarramento é necessária para identificar a prioridade da manutenção.

Choudhury *et al.* (2006) propuseram dois métodos para a quantificação do agarramento: o primeiro, baseado no ajuste de uma elipse aos dados do diagrama PV(OP), sendo que a máxima largura da elipse na direção horizontal é definida como o valor do agarramento aparente. O segundo método é baseado nas técnicas de agrupamento por *clusters*, para isso são formados dois cluster e a distância entre os centros é definida como sendo o valor do agarramento aparente. Ambos os métodos são mostrados na Figura 2.8. Cuadros *et al.* (2010) aperfeiçoaram o método de Choudhury onde são selecionados os dados mais relevantes para o ajuste da elipse.

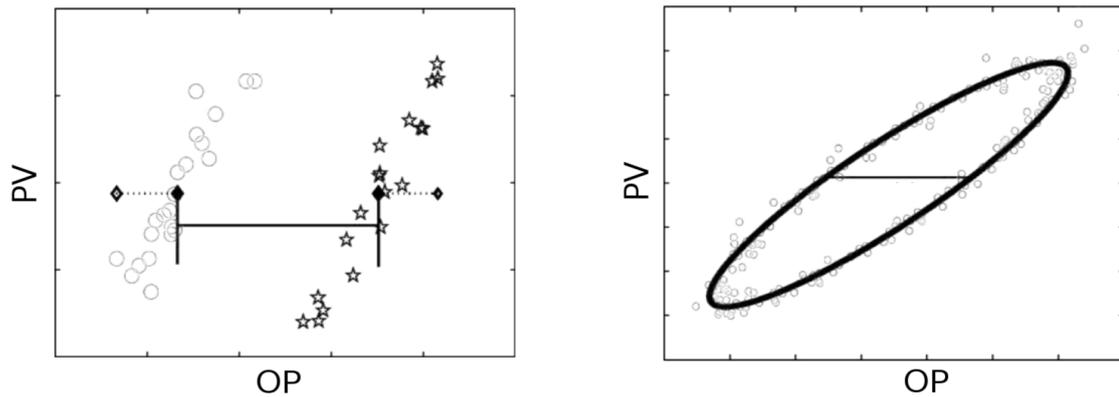


Figura 2.8: Método de quantificação do agarramento: (A) por agrupamento de dados em clusters; (B) ajuste de elipse. Adaptado de Choudhury *et al.* (2006).

Grande avanço na quantificação do agarramento foi atingido com a utilização de técnicas de identificação de sistema. Utilizando o modelo de Hammerstein, o sistema pode ser dividido em dois blocos: bloco não-linear, que representa a válvula com agarramento e bloco linear que representa a dinâmica do processo (Figura 2.9).

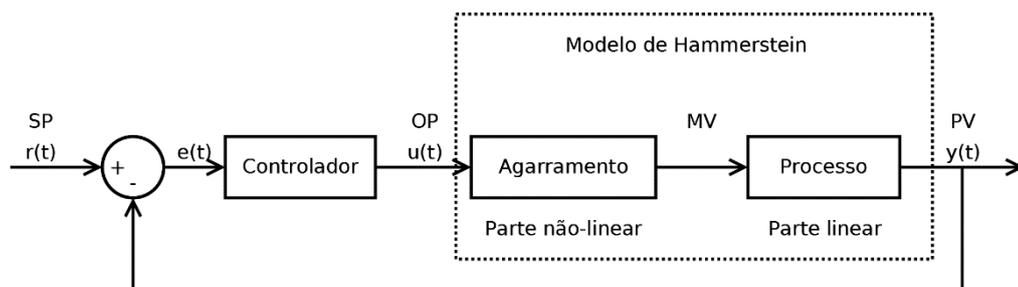


Figura 2.9: Diagrama para o modelo de Hammerstein.

O primeiro método baseado no modelo de Hammerstein é o trabalho de Stenman *et al.* (2003), onde o modelo de agarramento de Stenman e o modelo linear ARX foram utilizados. Em trabalho posterior, Srinivasan *et al.* (2005), utilizaram o modelos de a Stenman e o modelo linear ARMAX, onde o parâmetro de agarramento foi estimado por busca em *grid* e os parâmetros do modelo linear pelo método de mínimos quadrados.

Lee *et al.* (2008) utilizaram o método de mínimos quadrados para estimar tanto os parâmetros do modelo linear quando do modelo não linear, mas desta vez, o modelo de agarramento de He foi utilizado. O trabalho ainda define uma região de busca, criando restrições para a otimização. A técnica provou ser de baixo custo computacional, uma de suas principais vantagens.

Outros métodos de quantificação são baseados no modelo de Hammerstein sendo diferenciados em um dos seguintes pontos: modelo não-linear, modelo linear e a técnica de otimização utilizada. Alguns destes trabalhos são resumidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Métodos para a quantificação do agarramento baseados no modelo de Hammerstein.

Método	Modelo não-linear	Otimização para modelo não-linear	Modelo Linear	Otimização para modelo linear
Choudhury <i>et al.</i> (2008)	Choudhury	Busca em grid	ARX	Busca em grid
Jelali (2008)	Kano	Otimização global	ARMAX	Mínimos quadrados
Ivan <i>et al.</i> (2009)	He	Minimização do AIC*	ARMAX	Mínimos quadrados
Karra e Karim (2009)	Kano	Busca em grid	ARMAX	Busca em Grid
Lee <i>et al.</i> (2008)	He	Mínimos quadrados	ARX	Mínimos quadrados
Brasio <i>et al.</i> (2014b)	Chen	-	ARX	-
Farenzena e Trierweiler (2012)	Kano	Otimização global	-	Otimização global

* Akaike information criteria

Outros métodos são baseados no modelo de Wiener que, diferente do modelo de Hammerstein, apresenta o bloco do modelo não-linear após o bloco do modelo linear (Figura 2.10). O primeiro trabalho a utilizar essa técnica é o proposto por Wang e Wang (2009) que empregou a otimização por busca em grid para identificar os parâmetros do modelo não-linear de Chen.

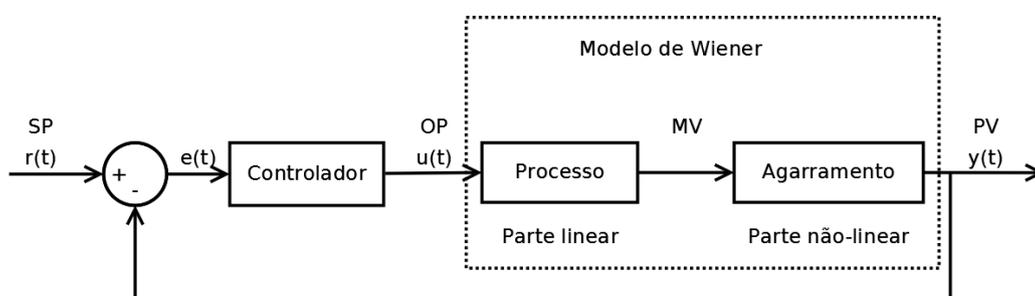


Figura 2.10: Diagrama para o modelo de Wiener.

Romano e Garcia (2011) adiciona outro bloco não linear referente ao distúrbio externo. O agarramento é modelado através do modelo de Kano, o bloco linear através do modelo ARMAX e o distúrbio através de função de transferência de n -ésima ordem. Para a identificação dos dois parâmetros de agarramento, o algoritmo *Simplex* foi utilizado.

2.2.4 Compensação do Agarramento

A ação mais adequada para corrigir o agarramento em válvulas de controle é a sua manutenção, mas nem sempre esse procedimento é viável. A manutenção pode requerer em casos extremos até parada do processo, que na maioria das vezes ocorre apenas em casos programados, normalmente entre 6 meses e 3 anos, o que significa que a válvula pode vir a operar em condições precárias durante um longo período (Silva e Garcia, 2014). Outros motivos que inviabilizam a manutenção são: quando o problema está no tipo de válvula/atuator que não podem ser substituídos por questões de segurança ou quando a

substituição do atuador é muito cara (Gerry e Ruel, 2001). Portanto, formas alternativas de minimizar o impacto negativo do agarramento devem ser consideradas.

Métodos de compensação do agarramento não serão utilizados neste trabalho, mas serão aqui resumidos de modo a completar a revisão bibliográfica referente à análise do agarramento. Os métodos de compensação adicionam um sinal à saída do controlador de modo a minimizar o efeito do agarramento (Figura 2.11), seguindo a literatura atual (Brásio *et al.*, 2014a) as técnicas podem ser divididos em cinco grupos, que por não possuírem termos em português, serão mantidos em inglês:

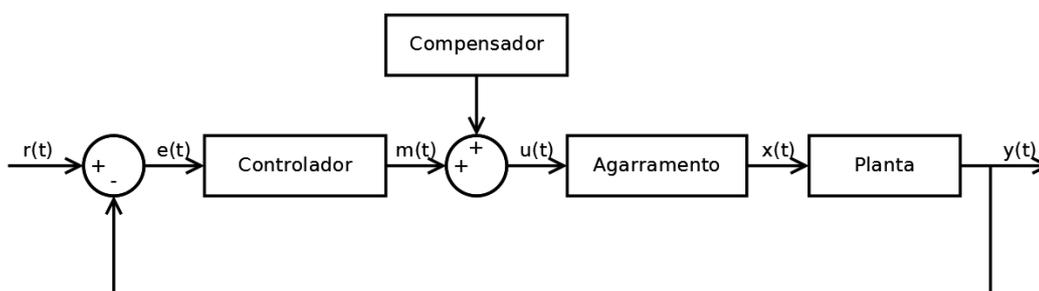


Figura 2.11: Adição de bloco de compensação do agarramento ao sistema.

Knocker ou Dither

Este método consiste na adição de um sinal de alta frequência ao sinal de saída do controlador, de forma a prevenir a oscilação na saída do processo (Figura 2.12.A). O primeiro método foi desenvolvido por Hägglund (2002) e consiste na adição de pulsos curtos de amplitude, duração e largura constantes que necessitam ser ajustados, já o sinal de cada pulso depende da taxa de variação do sinal do controlador. Este método é eficiente na eliminação da oscilação causada pelo agarramento, mas o movimento agressivo e constante da válvula causa o desgaste excessivo da haste.

Srinivasan e Rengaswamy (2005) integraram o método de Hägglund a métodos de quantificação de forma a ajustar os parâmetros do pulso de acordo com os parâmetros de agarramento obtidos. Como resultado, o método mostrou redução na agressividade do movimento da haste.

Constant Reinforcement

Proposto por Ivan e Lakshminarayanan (2009), este método é uma modificação simples dos métodos anteriores. Ao invés de um pulso, um sinal constante é adicionado à saída do controlador. A amplitude do pulso é calculada a partir de parâmetros de agarramento estimados por métodos de quantificação e o sinal do pulso é atribuído de acordo com a variação do sinal de saída do controlador. O método provou ser eficiente na eliminação da oscilação causada pelo agarramento, mas não elimina o problema com a agressividade no movimento da válvula.

Alternate Knocker

O método proposto por Srinivasan e Rengaswamy (2007) propõem a adição de um bloco especial ao algoritmo do controlador PID, entretanto, a variação causada pelo bloco

não é percebida pelo controlador, o que pode afetar o desempenho do controlador e instabilizar o sistema (Brásio *et al.*, 2014a).

Dois e Três Movimentos

Introduzido por Srinivasan e Rengaswamy (2008), os métodos do tipo dois movimentos buscam manter a válvula no estado estacionário, para isso, pelo menos dois movimentos em direção contrária são necessários (Figura 2.12.B). A magnitude do sinal de compensação deve ser suficiente para vencer a força causada pelo agarramento, mas limitada de modo a evitar a saturação da válvula. Esse modelo é ineficiente para processos onde o *setpoint* é alterado e pouco preciso devido à utilização do modelo de Stenman. Métodos posteriores como os propostos por Farenzena e Trierweiler (2010), Cuadros *et al.* (2010) e Wang (2013) visam corrigir estes problemas.

Karthiga e Kalaivani (2012) propuseram um método que utiliza três movimentos ao invés de dois. Como resultado, foi observado a redução na agressividade do movimento da válvula, do *overshot* e do tempo de assentamento.

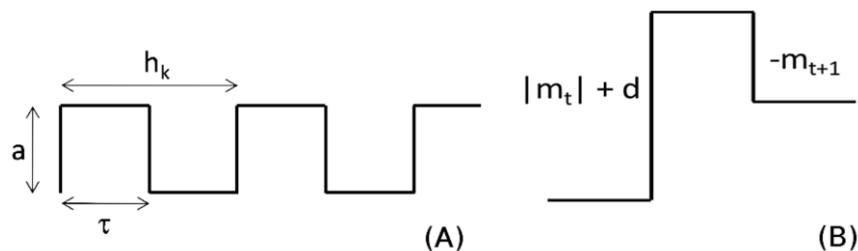


Figura 2.12: Compensação do agarramento: (A) *Knocker* ou *Dither*; (B) método de dois movimentos. Adaptado de Farenzena e Trierweiler (2010).

Compensação por Otimização

Proposto primeiramente por Srinivasan e Rengaswamy (2008), o método de compensação por otimização visa à minimização do movimento da válvula, variabilidade na saída do processo e da energia adicionada ao processo pelo compensador. A desvantagem do método é o elevado custo computacional quando aplicado à compensação de várias válvulas defeituosas. Além disso, a otimização pode retornar mínimos locais, o que pode impedir o processo de atingir o *setpoint*.

2.2.5 Considerações finais sobre o agarramento em válvulas de controle

Como observado, existe um grande número de modelos de agarramento, assim como métodos de detecção, quantificação e compensação de válvulas de controle. Apesar disso, alguns aspectos importantes são raramente discutidos pelos autores e de alguma forma podem prejudicar a aplicação de tais metodologias.

- Alguns métodos são baseados em valores de picos e vales. A tarefa para obtê-los é trivial para sinais suaves, mas extremamente complexa para sinais ruidosos, normalmente encontrados em dados industriais;
- Outros métodos são baseados nos valores de cruzamento do zero (pontos onde o sinal cruza o valor médio) que além de afetados pelo ruído, são

prejudicados pela média variável proveniente de distúrbios externos ou mudança do ponto de operação, por exemplo;

- A maioria dos trabalhos sugere o uso de filtros do tipo passa-baixa (elimina altas frequências) para a redução da interferência do ruído, mas estes filtros de alguma forma podem afetar as características do agarramento do sinal, além disso, podem adicionar defasagem.
- Raros artigos discutem os impactos econômicos do agarramento na indústria.

Segundo Horch (2007) apesar do grande número de métodos existente para a detecção do agarramento, não existe método que identifique o agarramento para qualquer circunstância. Cada método tem suas falhas e vantagens e depende da intervenção humana para a escolha adequada. Horch cita ainda a necessidade por um método de detecção para dados não estacionários.

No trabalho de Jelali e Scali (2010) onze técnicas de detecção do agarramento em válvulas de controle foram testadas com 93 malhas provenientes de indústrias químicas, papel e celulose, metalúrgicas, mineração e construção, onde a variável controlada é a vazão, pressão, nível, temperatura ou concentração. Alguns dos resultados são resumidos abaixo, para as malhas onde todos os métodos são aplicáveis:

- O resultado positivo para a presença de agarramento varia amplamente (de 38,4% a 84,6% das malhas analisadas de acordo com o método de detecção utilizado);
- O resultado negativo para a presença do agarramento possui, também, grande variação (de 11,5% a 42,3% das malhas analisadas de acordo com o método de detecção utilizado).

Como observado, existe grande divergência entre os resultados, dessa forma é concluído pelos autores que não existe método de detecção que seja totalmente confiável. Além disso, é novamente afirmado que é necessário a interação do usuário para a escolha adequada do método.

Ainda segundo Jelali e Scali (2010), um bom método de detecção do agarramento deve:

- Utilizar apenas dados usualmente disponíveis na indústria, como PV, SP e OP;
- Ser robusto a efeitos negativos, como ruído, média não-estacionária, distúrbios e múltiplas oscilações;
- Ser completamente automático, sem a exigência de interação com o usuário;
- Não possuir regiões de incerteza, se existir, ser bem definida e menor possível;
- Possuir índice que quantifique o agarramento na válvula.

Capítulo 3 – Detecção do Agarramento em Válvulas para Sinais com Referência Variável

Apesar do grande número de técnicas para o diagnóstico do agarramento em válvulas de controle, a grande maioria considera os sinais a serem analisados mantidos em uma referência fixa e não afetado por distúrbios externos, o que não é a regra para os casos industriais. Além disso, muitas válvulas estão sujeitas a controle do tipo cascata, o que também implica em média variável. Por consequência, métodos disponíveis de detecção não são eficientes para a maior parte dos sinais provenientes de plantas. Para ilustrar tal fenômeno, apresenta-se na Figura 3.1 o sinal da variável do processo (PV) proveniente de uma refinaria nacional para uma válvula com agarramento, nela verifica-se claramente a variação na tendência, o que acarreta em erros ou resultados incorretos para métodos de detecção existentes.

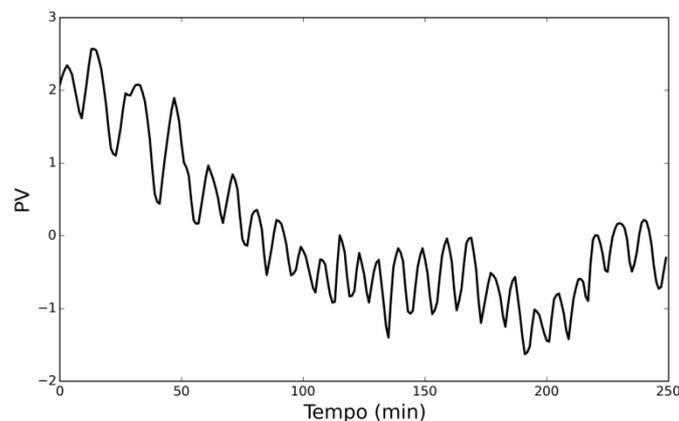


Figura 3.1: Sinal de saída do processo (PV) para medição da vazão em malha controlada por controle do tipo cascata.

Sendo assim, a proposta deste capítulo é apresentar novas técnicas para o diagnóstico do agarramento que não sejam afetadas pela presença da referência variável. Para isto, dois métodos foram propostos, ambos baseados na classificação do sinal em duas formas

padrões: triangular, que caracteriza o agarramento; e senoidal, que caracteriza a presença de distúrbios externos ou mau ajuste do controlador.

O presente capítulo é dividido da seguinte forma: na seção 1 os métodos de diagnóstico do agarramento baseados na inclinação do pico e na segmentação em zonas são apresentados. Na seção 2, as técnicas propostas serão comparadas com um método padrão de reconhecimento da forma do sinal. O capítulo finaliza com as considerações finais.

3.1 Técnicas Propostas

Esta seção apresenta duas técnicas para o diagnóstico do agarramento em válvulas de controle onde o ponto de operação varia com o tempo ou quando o processo é fortemente afetado por distúrbios externos. Ambos os métodos são baseados em técnicas de identificação da forma do sinal de modo a diferenciar o padrão triangular do senoidal. Os métodos necessitam apenas de dados da saída do controlador (OP) e da variável controlada (PV), tipicamente disponíveis em malhas de controle.

3.1.1 Inclinação dos Picos

O primeiro método proposto baseia-se na inclinação dos picos e vales do sinal. Quando um sinal possui forma triangular, a inclinação é aproximadamente igual a inclinação formada pela reta limitada por um pico e um vale; quando senoidal, a inclinação é próxima a zero, como ilustrado pela Figura 3.2.

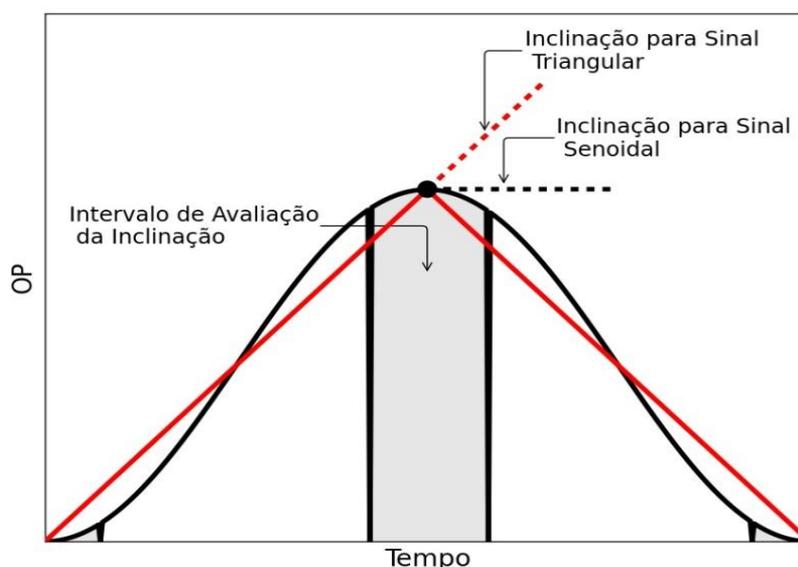


Figura 3.2: Inclinação para sinais padrão de forma senoidal e triangular.

Para este método, a inclinação do pico do sinal é comparada com a inclinação para o sinal triangular e para o sinal senoidal. O agarramento é confirmado caso a média das inclinações seja próxima da média para as inclinações do sinal triangular, caso contrário, a oscilação é causada por distúrbios externos ou má sintonia do controlador.

O procedimento para o primeiro método é descrito subsequentemente:

1. Dados de saída do controlador (OP), para processos autorregulatórios, ou da variável do processo (PV), para processos integradores, são coletados e os picos e vales identificados;
2. A inclinação do sinal original é calculada utilizando ponto de pico ou vale e demais pontos dentro do intervalo de avaliação, e o valor médio é calculado (S_{sig});
3. A inclinação padrão média para o sinal senoidal (S_{sin}) e triangula (S_{tri}) com a mesma frequência é calculada;
4. O índice de agarramento (SI_{sl}) é calculado baseado simplesmente em S_{sig} , S_{sin} e S_{tri} .

$$SI_{sl} = \frac{S_{sig} - S_{sin}}{S_{tri} - S_{sin}} \quad (3.1)$$

5. A seguinte regra é usada para diagnosticar o agarramento, baseada em experimentos:
 - $SI_{sl} \geq 0.5 \rightarrow$ agarramento;
 - $SI_{sl} \leq 0.3 \rightarrow$ sem agarramento;
 - $0.5 > SI_{sl} > 0.3 \rightarrow$ indeterminado;

Note que o índice não necessariamente pertence ao intervalo entre 0 e 1. Se a média da inclinação para o sinal original é maior que a inclinação média para o sinal padrão triangular o índice será maior que 1; se menor que a média para o sinal padrão senoidal, o índice será menor que 1. O intervalo de avaliação corresponde a pontos localizados 20% para a esquerda ou direita de cada pico ou vale em cada meio-ciclo, isto garante que apenas a região com a maior diferença entre as inclinações para o sinal triangular e senoidal seja avaliada.

Para melhor entendimento, considere o sinal proveniente do trabalho de Jelali e Scali (2010) mostrado na Figura 3.3(A). Os dados são derivados de uma indústria química onde a variável controlada é a vazão, desta forma o processo é do tipo autorregulatório e o sinal avaliado é a saída do controlador (OP). Além disso, segundo o autor, a presença de agarramento é certa. A Figura 3.3(B) apresenta a inclinação para o sinal original, como visto, a inclinação deve sempre ser calculada através de um pico ou vale e os demais pontos dentro da mesma região de avaliação, a largura da região varia de acordo com o período de cada meio-ciclo que, diferente dos métodos de He *et al.* (2007) e Rossi e Scali (2005), por exemplo, são definidos pelos picos e vales e não pelos valores de cruzamento dos zeros.

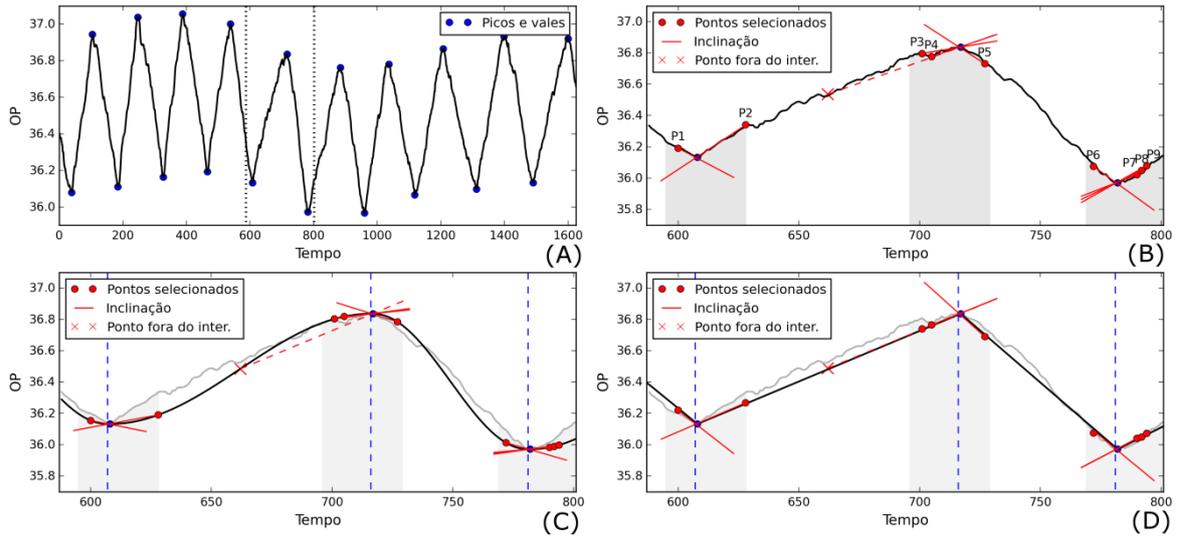


Figura 3.3: Identificação do agarramento para o método de inclinação dos picos: (A) identificação dos picos e vales; (B) avaliação da inclinação para o sinal original; (C) avaliação da inclinação para o sinal padrão senoidal; (D) avaliação da inclinação para o sinal padrão triangular. Dados de Jelali e Scali (2010).

O sinal padrão senoidal (Figura 3.3(C)) é construído para cada meio ciclo através da Equação 3.2.

$$f_i(t) = \frac{p_{i+1} + p_i}{2} + \frac{p_{i+1} - p_i}{2} * \sin \frac{t - T_i}{2 * (T_{i+1} - T_i)} * \pi + 3 * \frac{\pi}{2} \quad (3.2)$$

onde p e T são os vetores de tamanho N correspondentes respectivamente ao valor de OP (ou PV) e o tempo para os picos e vales e $i = 1, 2, \dots, N - 1$ corresponde cada meio-ciclo.

O sinal triangular padrão é construído a partir da interpolação entre os picos e vales e assim, a inclinação é calculada. Como visto na Figura 3.3(D), não é necessário o cálculo da inclinação para todos os pontos, já que esta é igual para pontos pertencentes ao mesmo intervalo de avaliação (apresentado pelos pontos P7, P8 e P9).

De modo a ilustrar o comportamento da inclinação para pontos fora do intervalo de avaliação, um ponto intermediário ao meio-ciclo foi escolhido, como visto na Figura 3.3 a inclinação para o sinal padrão senoidal é idêntica à inclinação para o sinal padrão triangular, assim a diferenciação dos sinais não pode ser feita, demonstrando a importância da análise apenas para a região de avaliação. Tabela 3.1 mostra o resultado para todos os pontos selecionados.

Tabela 3.1: Inclinação para o sinal original, triangular e senoidal para os pontos selecionados; média do valor absoluto da inclinação para os pontos selecionados e para todos os pontos dentro do intervalo de avaliação (10^{-3}).

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Seleç.	Todos
t (s)	600	628	701	705	727	772	790	792	794	-	-
Original	-8,49	9,90	2,64	5,45	-9,62	-11,63	5,71	7,05	8,39	7,65	8,23
Triangular	-3,21	2,76	2,20	1,62	-4,64	-4,61	1,35	1,72	2,09	2,69	2,45
Senoidal	-12,58	6,46	6,46	6,46	-13,31	-13,31	7,75	7,75	7,75	9,09	10,46

Devido à presença de ruído, existem pontos onde o valor da inclinação é mais próximo à inclinação do sinal triangular e outros mais próximo da inclinação do sinal senoidal (P3 para esta análise), mas, em média, o valor da inclinação apresenta valores mais próximos da inclinação do sinal triangular e o valor encontrado para $S_{I_{sl}}$ (calculado pela Equação 3.1) é igual a 0,775. A avaliação completa para todos os pontos pertencentes ao intervalo de avaliação resultou em $S_{I_{sl}}$ é igual a 0,722.

3.1.2 Segmentação em zonas

Seguindo a mesma ideia de identificação da forma do sinal, a segunda técnica é baseada na segmentação dos dados em zonas. A forma triangular é diferenciada da forma senoidal pelo número de pontos da zona superior e inferior. A distribuição para o sinal senoidal é significativamente maior que a distribuição para o sinal triangular. A Figura 3.4 ilustra a segmentação do sinal senoidal e triangular padrão em seis zonas.

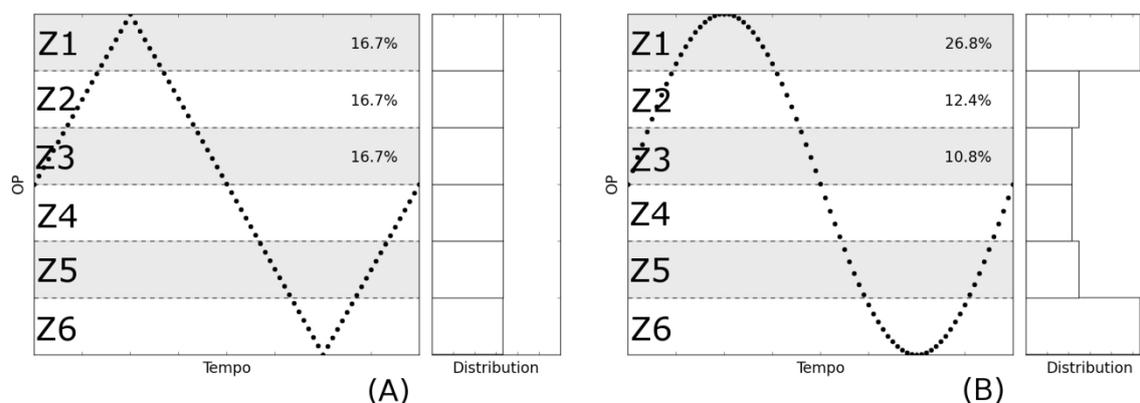


Figura 3.4: Segmentação em seis zonas para: (A) sinal padrão senoidal e (B) sinal padrão triangular.

Como ilustrado pela Figura 3.4, para a segmentação do sinal em seis zonas mais de 50% dos dados estão nas zonas 1 e 6 para o sinal senoidal, mas apenas 33,3% dos dados estão nessas mesmas zonas para o sinal triangular. Obviamente, esses valores devem variar de acordo com o número de zonas utilizadas.

A seguir, o processo para o diagnóstico por este método é descrito:

1. Dados de saída do controlador (OP) ou da variável do processo (PV) são coletados e os picos e vales identificados;

2. O sinal é segmentado em zonas de mesma magnitude limitada por valores de picos e vales e a média da distribuição dos segmentos de topo e fundo (F_{sig}) é calculada;
3. A distribuição para o sinal padrão senoidal (F_{sin}) e triangular (F_{tri}) com a mesma frequência e número de zonas do sinal original é obtida;
4. O índice de agarramento (SI) é calculado seguindo-se a equação

$$SI_{zn} = 1 - \frac{F_{sig} - F_{tri}}{F_{sin} - F_{tri}} \quad (3.3)$$

5. A seguinte heurística é utilizada para o diagnóstico do agarramento, baseada em experimentos:

- $SI_{zn} \geq 0.4 \rightarrow$ agarramento;
- $SI_{zn} \leq 0.2 \rightarrow$ sem agarramento;
- $0.2 < SI_{zn} < 0.4 \rightarrow$ indeterminado

Como exemplo, considere novamente o sinal da Figura 3.3, a segmentação em zonas de um fragmento deste sinal é representada pela Figura 3.5. Sabendo que a válvula apresenta agarramento, o sinal deve exibir padrão triangular e cada segmento deve possuir distribuição aproximadamente igual a 16,6% (segundo a Figura 3.4). A presença de ruído desvia o valor encontrado do ideal fazendo a distribuição variar entre 8,82% e 25,4%, mas em média, a distribuição torna-se próxima a de um sinal triangular. Para a análise completa do sinal, o valor encontrado de SI_{zn} foi 0,89 indicando forte presença de agarramento.

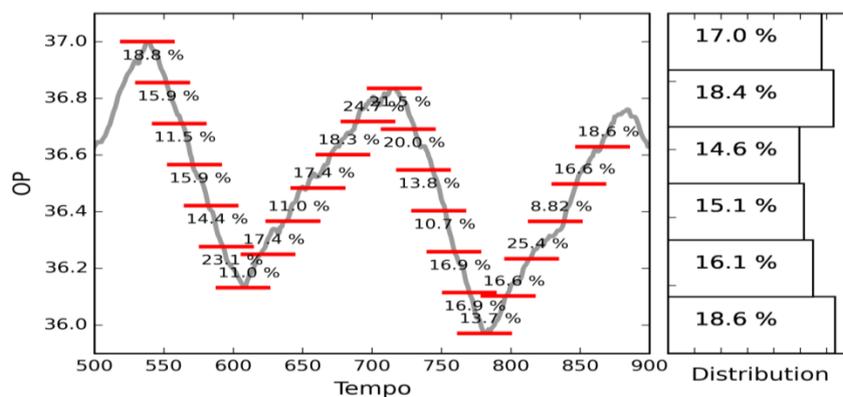


Figura 3.5: Identificação do agarramento para o método de segmentação em zonas. Os dados foram segmentados em 6 zonas e a distribuição foi encontrada. Na direita, a distribuição para todo o sinal. Dados de Jelali e Scali (2010).

As principais vantagens desses métodos é a não necessidade da remoção da tendência, não utilização de ajuste e a fácil implementação. Estas características fazem com que o método seja de baixa demanda computacional permitindo que a identificação do agarramento seja feita a partir do sinal original sem perdas das características do agarramento.

O principal desafio desses dois métodos é a necessidade de encontrar os picos e vales, que pode ser uma tarefa complexa para sinais ruidosos. Para se realizar essa atividade, se desenvolveu uma metodologia para o pré-processamento de sinais, a qual é apresentada no Capítulo 4 desta dissertação. Os parâmetros utilizados para a classificação da causa da oscilação através do índice de agarramento não possuem definição física ou matemática, esses foram selecionados a partir de experimentos de modo a se obter o maior número de detecções corretas.

3.2 Estudo de Casos

Para a validação das técnicas propostas, o estudo de caso foi dividido em duas etapas: estudo de caso a partir de dados obtidos por simulação e estudo de caso para dados industriais. Para todos os casos, os métodos propostos para a identificação do agarramento pela inclinação dos picos e pela segmentação em zonas são confrontados com o método ajuste de curvas proposto por He *et al.* (2007), já que esse também é baseado na forma do sinal e é amplamente citado na literatura.

3.2.1 Estudo de caso para dados simulados

Os dados simulados foram gerados a partir de implementações feitas em Matlab e salvos em arquivos do tipo CSV (*Comma-separated values*) para posterior análise pelas implementações feitas em Python. As simulações foram conduzidas por 3000 segundos e os dados foram amostrados a cada 1 segundo. O modelo baseado em dados de Kano foi utilizado para o bloco do agarramento. Para a detecção, os primeiros 1000 pontos foram descartados, assim, evitando a análise da região transiente do sinal.

Para a primeira e segunda análise, a capacidade de detecção do o agarramento será comprovada para sinais com o sinal de referência fixo. Na terceira e quarta análise, distúrbios e a atualização de malha cascata são utilizados, para, desta forma, demonstrar a vantagem do método proposto para sinais com a presença de média variável. A malha *feedback* utilizada para todas as simulações possui controlador PI e planta de primeira ordem.

Para a primeira análise, uma malha padrão SISO é utilizada com a adição de um bloco correspondente ao modelo do agarramento (Figura 3.6). Neste caso, não há adição de distúrbio ou ruído ao sinal, por consequência, a referência é mantida constante. Um total de 27720 cenários foram avaliados, com parâmetros de agarramento, controlador e planta variáveis, como apresentado na Tabela 3.2. O ganho do processo é mantido constante com valor unitário.

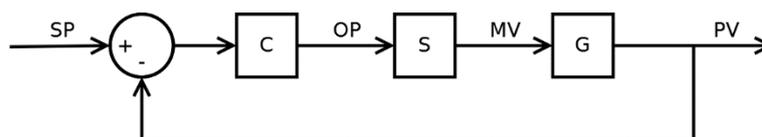


Figura 3.6: Representação do primeiro cenário: malha *feedback* apenas com agarramento.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados para a primeira análise: sem distúrbio e ruído adicionados.

Variável	Descrição	Valores
S	Banda estática	[3, 4, ..., 8]
J	Salto	[0,5, 0,7, ..., 1,5] S
τ	Constante de tempo do processo	[10, 20, ..., 100]
K_P	Ganho do controlador PI	[1, 1,4, ..., 3]
τ_I	Ação integral do controlador	[1, 1,3, ..., 2,8] τ

A análise pretende identificar erros do tipo 2 (i.e., onde a válvula apresenta agarramento, mas este não é identificado – falsos negativos). Baseado na Tabela 3.3 pode ser concluído que a capacidade de ambas as técnicas propostas e o método tradicional de ajuste de curvas apresentam praticamente os mesmos resultados. Apenas o método de detecção por segmentação em zonas demonstrou ser levemente menos eficiente.

Tabela 3.3: Percentagem de detecções corretas para a primeira análise.

Método	Ajuste de curvas	Incl. dos picos	Seg. em zonas
Resultados	99,9%	99,4%	98,4%

A segunda análise pretende identificar erro do tipo 1 (falso positivos), onde o agarramento não existe, mas é erroneamente identificado. Novamente, malha *feedback*, planta de primeira ordem e controlador PI são utilizados. Neste caso, o agarramento não é adicionado e um distúrbio periódico de frequência variável é inserido à variável de processo, como mostrado na Figura 3.7. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros utilizados para este cenário.

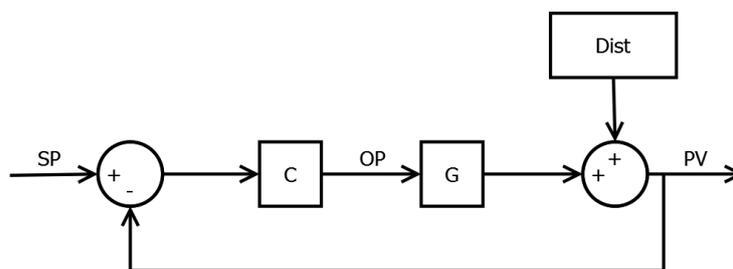


Figura 3.7: Representação do segundo cenário: malha *feedback* com adição de distúrbio.

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para a segunda análise: distúrbio periódico adicionado ao sinal sem agarramento.

Variável	Descrição	Valores
τ	Constante de tempo do processo	[10, 20, ..., 100]
DPer	Período do distúrbio	[16, 32, 64, 128, 512]
K_P	Ganho do controlador PI	[1, 1,4, ..., 3]
τ_I	Ação integral do controlador	[1, 1,3, ..., 2,8] τ

Como ilustrado na Tabela 3.5, os métodos identificaram o distúrbio externo com eficiência, o que corrobora o resultado anterior onde os métodos propostos e a técnica original de ajuste de curvas apresentam resultados semelhantes na identificação do agarramento ou distúrbio para o sinal de referência fixado.

Tabela 3.5: Percentagem de detecção corretas para a segunda análise.

Método	Ajuste de curvas	Incl. dos picos	Seg. em zonas
Resultados	98,3%	100,0%	100,0%

Para a terceira análise, a malha *feedback* é afetada por duas rampas e um ruído colorido. O diagrama de blocos para o cenário é ilustrado na Figura 3.8.

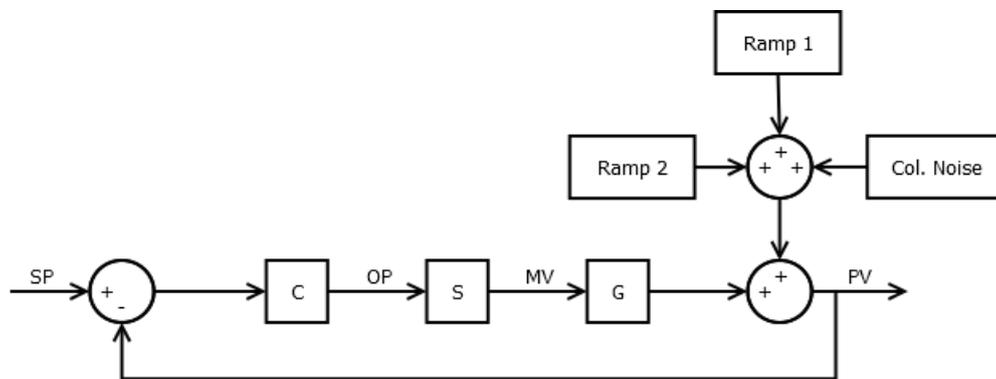


Figura 3.8: Representação do terceiro cenário: malha *feedback* afetada por distúrbios.

onde C é o controlador PI, G é a planta de primeira ordem, S é o modelo de agarramento, SP o *setpoint*, OP a saída do controlador e PV a variável do processo. O distúrbio é gerado para adição de três componentes:

- Ramp 1: rampa com inclinação positiva e início no tempo 0;
- Ramp 2: rampa com inclinação negativa e início no tempo 1500;
- Col. Noise: ruído branco, com magnitude igual à *cnp*, aplicado a um modelo de primeira ordem, com ganho unitário e constante de tempo igual a 100;

Uma variação unitária no *setpoint* é aplicada no tempo igual a 100. Os parâmetros para o terceiro cenário são observados na Tabela 3.6, desse modo, 5400 cenários foram analisados.

Tabela 3.6: Parâmetros para a terceira análise: processo afetado por duas rampas e ruído colorido.

Variável	Descrição	Valores
K	Ganho do processo	1
τ	Constante de tempo do processo	20
τ_D	Constante de tempo do distúrbio	100
K_P	Ganho do controlador PI	2
τ_I	Ação integral do controlador	15

Vários parâmetros de agarramento, controlador e planta são testados. A Tabela 3.7 mostra o intervalo para cada parâmetro.

Tabela 3.7: Parâmetros variáveis e respectivos intervalos avaliados na terceira análise: processo afetado por duas rampas e ruído colorido.

Variável	Descrição	Valores
S	Banda estática	[3, 4, ..., 8]
J	Salto	[0,5, 0,7, ..., 1,5] S
slp ₁	Inclinação da rampa para distúrbio positivo	[0, 0,001, 0,005, 0,01, 0,05]
slp ₂	Inclinação da rampa para distúrbio negativo	[0, 0,001, 0,005, 0,01, 0,05]
cnp	Força do ruído branco	[0, 10, 50, 100, 500, 1000]

A Figura 3.9 mostra um sinal proveniente da terceira análise onde a presença de referência variável é evidente. Valores dos zeros usados pelo método de ajuste de curva são afetados pelo desvio na referência, diferente dos picos e vales que são independentes dessa variação. Assim, o índice de agarramento para a técnica de inclinação dos picos e segmentação em zonas foi de respectivamente 0,785 e 0,826 indicando presença evidente de agarramento, enquanto que o índice para o método de ajuste de curva é igual a 0,572 representando a região de resultado incerto.

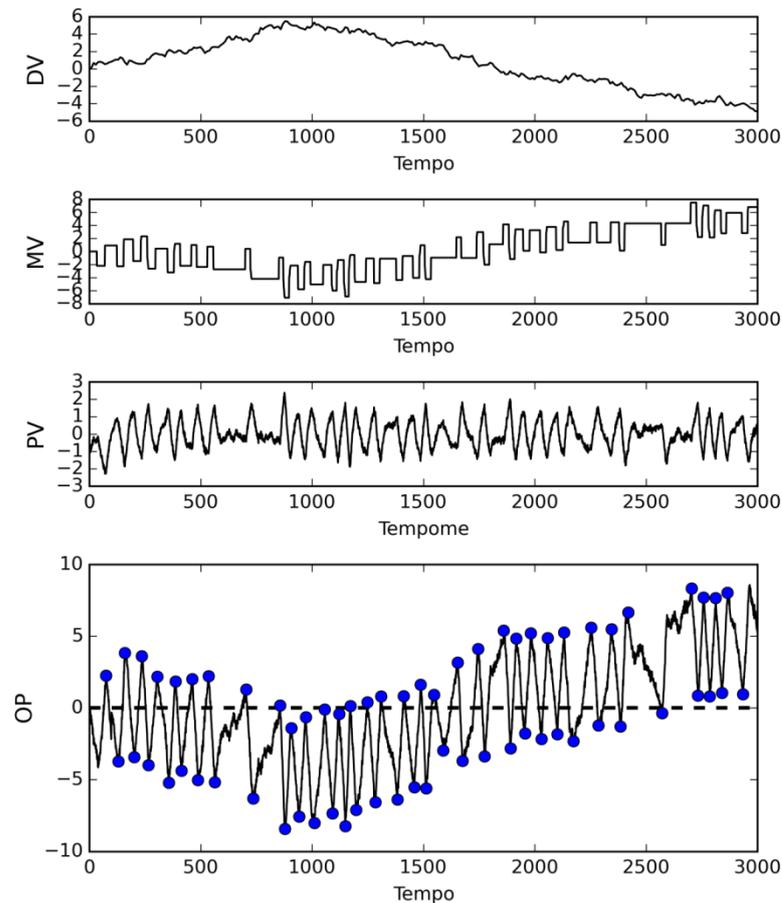


Figura 3.9: Exemplo de sinal proveniente da terceira simulação onde a presença de referência variável é evidente.

O resultado da análise é resumido na Tabela 3.8. Como observado, as técnicas propostas demonstraram grande vantagem quando comparado ao método de ajuste de curvas, onde a técnica baseada na inclinação dos picos identificou o agarramento em praticamente todos os casos.

Tabela 3.8: Percentagem de detecção corretas para a terceira análise.

Método	Ajuste de curvas	Incl. dos picos	Seg. em zonas
Resultados	72,0%	98,0%	87,0%

Para a quarta e última análise, uma malha do tipo cascata foi considerada, para isso, dois controladores PI foram utilizados, entretanto apenas a malha interna apresenta o bloco do agarramento. Os distúrbios são adicionados à variável controlada. A Figura 3.10 ilustra o diagrama de blocos para a quarta análise.

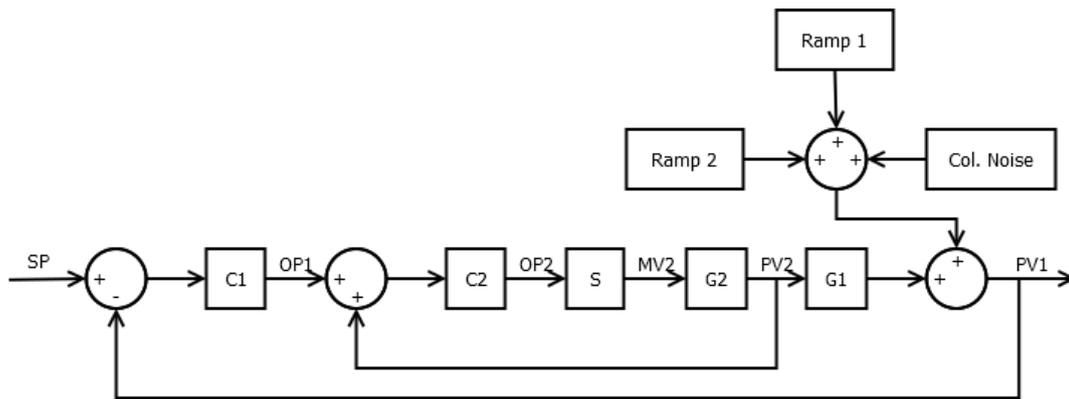


Figura 3.10: Representação do quarto cenário: malha cascata afetado por distúrbios.

Os mesmos parâmetros para os distúrbios da terceira análise são utilizados. Os parâmetros para o controlador e planta estudados são mostrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Parâmetros para a quarta análise: malha cascata afetada por duas rampas e ruído colorido

Variável	Descrição	Valores
K_1	Ganho da planta externa (G_1)	1
t_1	Constante de tempo da planta externa (G_1)	50
K_2	Ganho da planta interna (G_2)	1
t_2	Constante de tempo da planta interna (G)	20
τ_D	Constante de tempo do distúrbio	100
K_{P1}	Ganho do controlador PI da planta externa (C_1)	2
τ_{I1}	Ação integral do controlador PI da planta externa (C_1)	15
K_{P2}	Ganho do controlador PI da planta interna (C_2)	1
τ_{I2}	Ação integral do controlador PI da planta interna (C_2)	40

A Figura 3.11 ilustra um exemplo de sinal proveniente da quarta simulação. Para este caso, a referência apresenta variação mais acentuada, o que faz com que parte do sinal seja posicionado totalmente acima ou totalmente abaixo da linha do zero. Para este caso, a aplicação do método de ajuste de curva resultaria em erro ou resultado inconsistente, para os métodos de inclinação dos picos e segmentação em zonas os resultados para o índice foram de respectivamente 0,950 e 0,840.

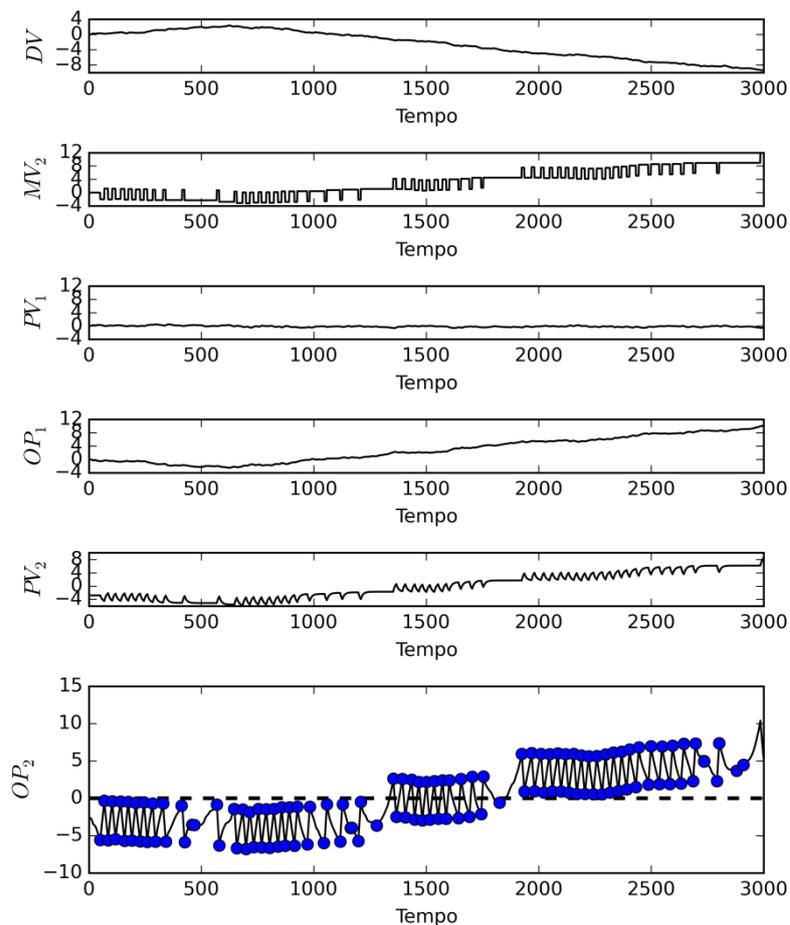


Figura 3.11: Exemplo de sinal da quarta análise onde o método de ajuste de curva não pode ser aplicado diretamente.

A Tabela 3.10 apresenta os resultados para a quarta análise, onde novamente é comprovada a eficiência das técnicas propostas em relação ao método de detecção por ajuste de curvas a sinais com referência variável. O método baseado na inclinação dos picos apresenta resultado muito satisfatório, diagnosticando o problema corretamente em todos os casos já o método baseado na segmentação dos dados apresenta resultado melhor que a técnica de ajuste de curvas, mas falha na detecção de aproximadamente 11% dos casos.

Tabela 3.10: Percentagem de detecção corretas para a quarta análise.

Método	Ajuste de curvas	Incl. dos picos	Seg. em zonas
Resultados	77,0%	100,0%	89,0%

As análises 3 e 4 demonstraram as vantagens dos métodos propostos em relação ao original proposto por He *et al.* (2007). Enquanto o de ajuste de curvas falha em aproximadamente 25% dos casos, o método baseado na segmentação dos dados falha em média em 12% e a técnica baseada na inclinação dos picos em média em apenas 1%.

3.2.2 Dados de Planta

Nesta seção, os métodos propostos são aplicados a dados provenientes de plantas industriais. Primeiramente, as técnicas são avaliadas a partir de dados provenientes de duas válvulas de uma refinaria nacional e, posteriormente, com dados fornecidos por Jelali e Scali (2010).

Ambas as válvulas da refinaria analisadas são responsáveis pelo controle da vazão, os dados para a primeira válvula são demonstrados na Figura 3.12.

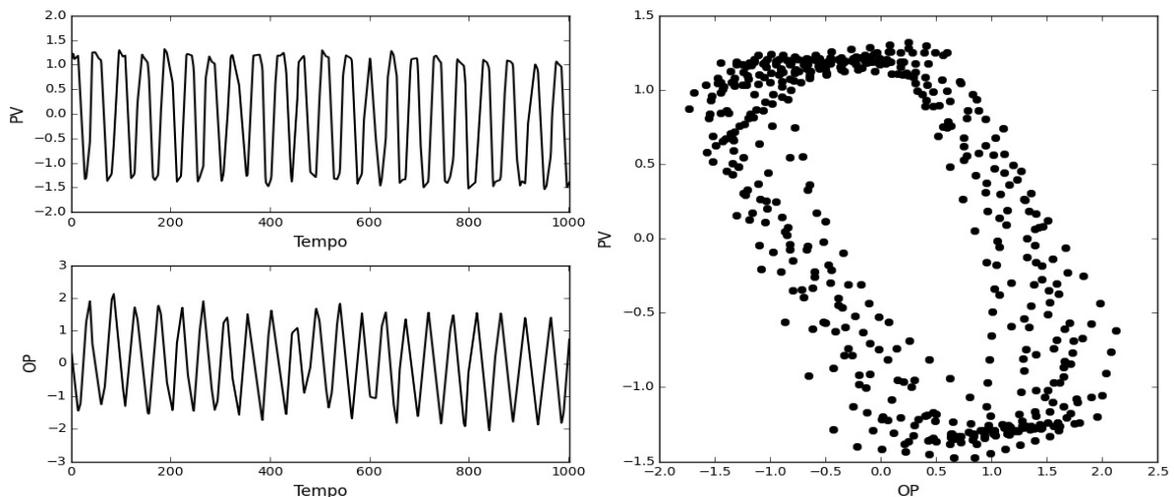


Figura 3.12: Sinal de saída do controlador (OP), da variável manipulada (PV) e gráfico de fase para dados da primeira válvula.

Baseado no gráfico de fase, a presença de agarramento é clara. Além disso, estes dados devem ser facilmente identificados pelos métodos, já que a referência é mantida constante. Aplicando os três algoritmos, o agarramento é confirmado para todos os casos sendo o índice de agarramento igual a 0, 764, 0,722 e 0,608 respectivamente para os métodos de ajuste de curvas, inclinação dos picos e segmentação em zonas.

A segunda válvula, cujos dados são ilustrados na Figura 3.13, é uma malha do tipo cascata.

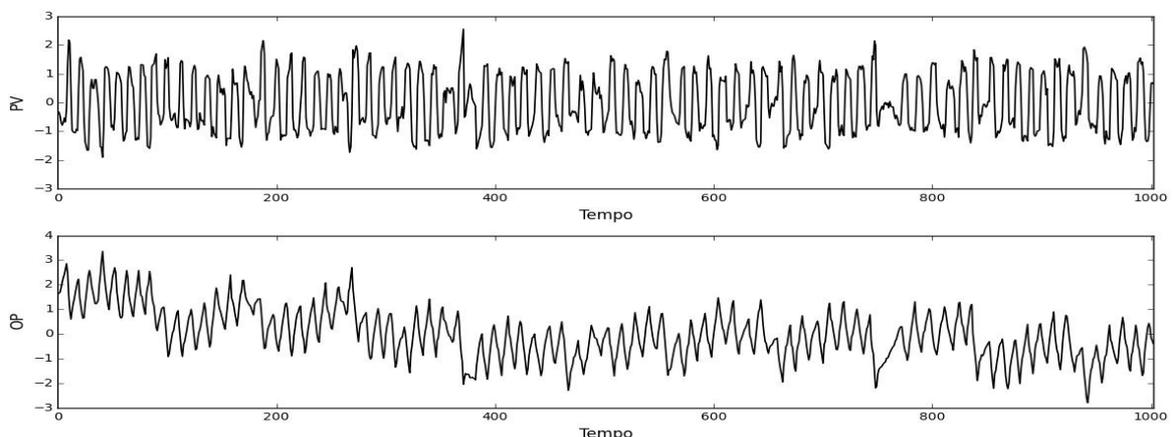


Figura 3.13: Segunda válvula industrial com malha do tipo cascata com agarramento.

Por inspeção visual, é possível confirmar o agarramento, mas neste caso, a referência é variável. Aplicando-se as três técnicas a forma triangular foi identificada pelos métodos propostos para o sinal OP, mas para o método de ajuste de curvas, o agarramento não foi encontrado. O resultado para o índice de agarramento foi igual a 0,545, 1,125 e 0,667

respectivamente para os métodos de ajuste de curvas, inclinação dos picos e segmentação em zonas.

Para uma segunda comparação utilizando dados industriais, 20 malhas com problemas conhecidos fornecidas por Jelali e Scali (2010) foram consideradas. Todas as 20 malhas são consideradas sendo processos do tipo autorregulatórios e o resultado para o método de ajuste de curva já é conhecido. Os métodos propostos são avaliados e os resultados são demonstrados na Tabela 3.11. O resultado para todas as outras malhas que não apresentam problemas conhecidos pode ser encontrado no apêndice 1 deste trabalho.

Tabela 3.11: Eficiência dos métodos propostos para dados industriais fornecidos por Jelali e Scali (2010).

Algoritmo	Corretamente identificado	Identificação Incorreta	Incerto
Ajuste de curvas	55,0%	30,0%	15,0%
Incl. dos picos	60,0%	20,0%	20,0%
Seg. em zonas	65,0%	25,0%	10,0%

Baseado na Tabela 3.11, ambos os métodos propostos apresentam melhores resultados quando comparado com o método de He *et al.* (2007). Entretanto, o método baseado na inclinação dos picos atingiu menos resultados incorretos, enquanto que o método de segmentação em zonas apresentou mais resultados corretos. Esse resultado demonstra a vantagem dos métodos propostos aplicados a dados industriais, onde a presença de referência variável é frequentemente encontrada. Como exemplo, a malha CHEM14 (Figura 3.14) que não possui agarramento, apresenta clara evidência de referência variável. Aplicando as três técnicas o resultado encontrado foi: a presença de agarramento para o método de ajuste de curva, causa incerta de oscilação para o método de inclinação dos picos, e não evidência de agarramento para o método de segmentação em zonas.

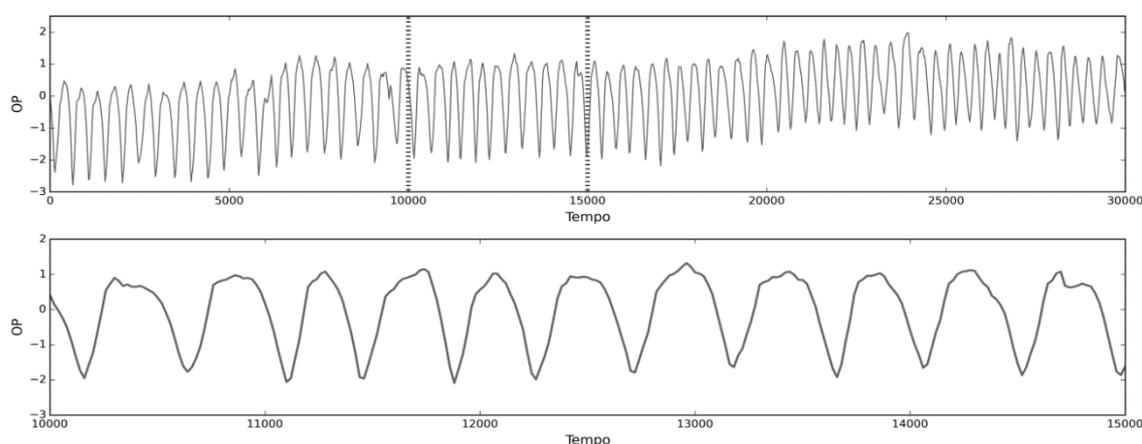


Figura 3.14: Malha industrial CHEM14 com clara presença de referência variável. Dados emprestados de Jelali e Scali (2010).

Outro exemplo, a malha CHEM13 (Figura 3.15) também apresenta evidente presença de referência variável. Como visto os valores dos zeros não podem ser identificados diretamente, pois parte do sinal se encontra completamente acima ou abaixo da linha zero. Duas alternativas são viáveis: avaliar apenas parte do sinal onde a referência é mantida constante ou a alternativa adotado por Jelali e Scali (2010) que é a remoção da tendência. Como visto na mesma figura, o ajuste linear para a remoção da tendência reduz, mas não

elimina completamente o problema. Por fim, o índice de agarramento encontrado para o método de ajuste de curva foi de 0,33, próxima a região de incerteza (entre 0,4 e 0,6) para os métodos propostos, o valor dos índices SI_{sl} e SI_{zl} foram de respectivamente 0,032 e 0,071 indicando forte evidência de distúrbio externo ou má sintonia do controlador. No Capítulo 4, técnicas para a remoção da referência variável serão apresentadas, assim, o método de ajuste de curva poderá ser utilizado com maior eficiência.

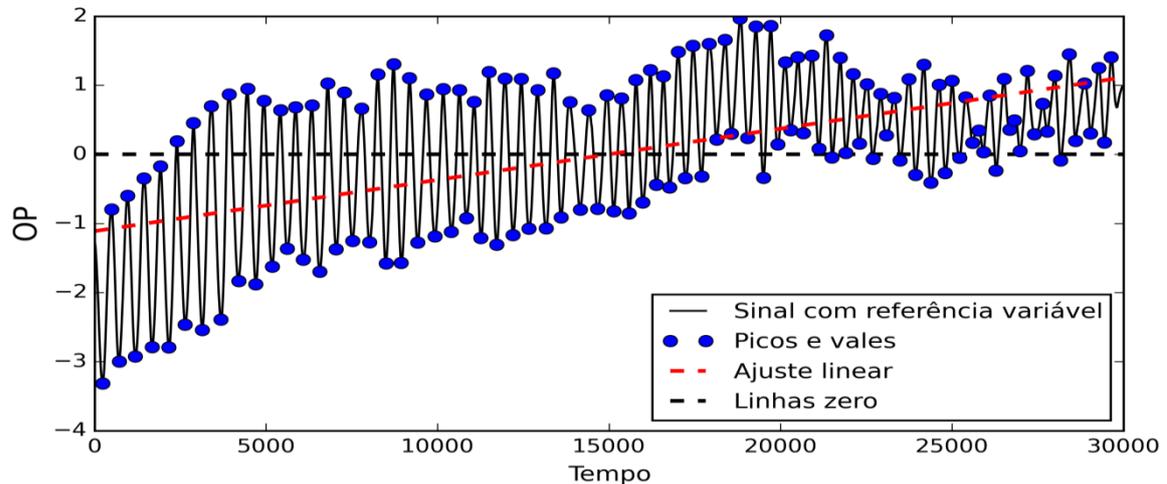


Figura 3.15: Malha industrial CHEM13 onde o uso de pré-processamento de sinais é requerido para o método de ajuste de curva para a remoção da tendência. Dados fornecidos por Jelali e Scali (2010).

3.2.3 Análise para casos especiais

De modo a avaliar a eficiência dos métodos propostos a diferentes cenários, simulações foram reavaliadas para processos com a presença de ruído, tempo morto, processos integradores e com sinais de diferentes amostragens.

Análise da sensibilidade ao ruído.

Para a análise da sensibilidade ao ruído, um sinal da terceira análise foi usado e ruído branco com variância entre 0 e 0.1 foi adicionado ao sinal normalizado como mostrado na Figura 3.16. Testes foram feitos para o método de ajuste de curvas e para as técnicas propostas, e o resultado é mostrado na Figura 3.18(A). Como já visto, o índice de agarramento para as técnicas propostas é afetado pela presença de ruído, de modo que o pré-processamento dos dados é necessário.

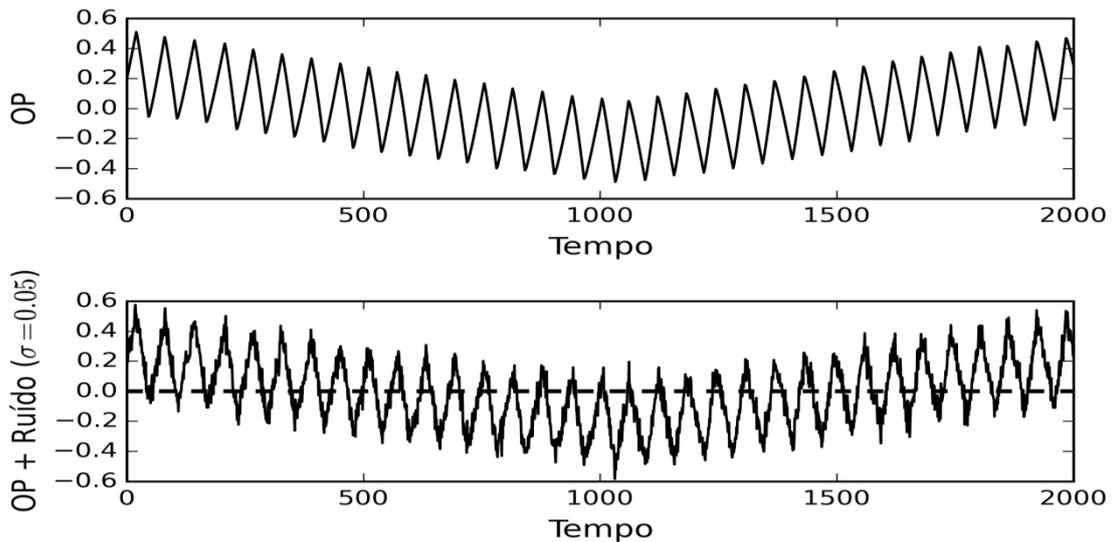


Figura 3.16: Sinal proveniente da terceira simulação, onde τ_D foi mantido nulo e o valor dos seguintes parâmetros foi estabelecido: $S = 5$, $J = 3$, $slp1 = 0,005$, $slp2 = -0,01$, $cnp = 0$. Abaixo, exemplo de sinal para a análise da sensibilidade onde ruído branco de variância igual a 0,05 foi adicionado.

A análise sobre o pré-processamento de dados para métodos de detecção do agarramento será melhor explicada no Capítulo 4. Para a redução do ruído, um filtro do tipo passa-baixa pode ser utilizado. A frequência de corte do filtro deve ser escolhida de modo a reduzir o efeito do ruído sem remover as características fundamentais que identificam a forma do sinal. Para o sinal triangular, o espectro é apresentado na Figura 3.17 onde pode ser observada a presença da frequência fundamental e dos harmônicos.

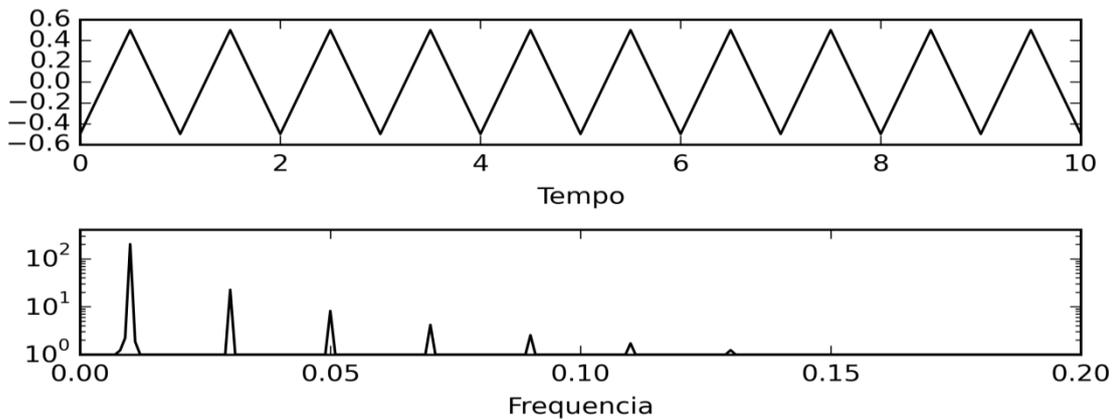


Figura 3.17: Espectro de sinal triangular padrão para sinal com 100 dados por ciclo.

A Tabela 3.12 apresenta o efeito da frequência de corte ao sinal triangular no índice de agarramento para os três métodos em estudo, como observado, para os métodos de ajuste de curva e segmentação em zonas a presença dos 7 primeiros harmônicos é suficiente (frequência de corte igual a 7,5 vezes a frequência de oscilação) para que o índice indique forte presença de agarramento, para o método de inclinação dos picos, são necessários ao menos a presença dos 13 primeiro harmônicos (frequência de corte igual a 13,5 vezes a frequência de oscilação).

Tabela 3.12: índice de agarramento para o método de ajuste e as técnicas propostas para diferentes frequências de corte

Harmônicos	1	3	5	7	9	11	13
W_c / W_{osc}	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5	11,5	13,5
Ajuste de curvas	0	0,185	0,354	0,4784	0,56184	0,619	0,661
Incl. dos picos	0	0,458	0,718	0,837	0,877	0,887	0,897
Seg. em zonas	0	0,728	0,942	0,978	0,989	0,9937	0,9961

O resultado após o uso do filtro é mostrado na Figura 3.18. O índice para o método de ajuste de curva e segmentação em zonas torna-se praticamente independente do efeito do ruído, mas para o método de inclinação dos picos a alta frequência de corte escolhida não foi suficiente para eliminar o efeito do ruído, mas foi suficiente para suavizar o sinal de modo que o índice de agarramento foi reduzido. Por esta análise é possível concluir que o método de inclinação dos picos não é recomendado para sinais com forte presença de ruído.

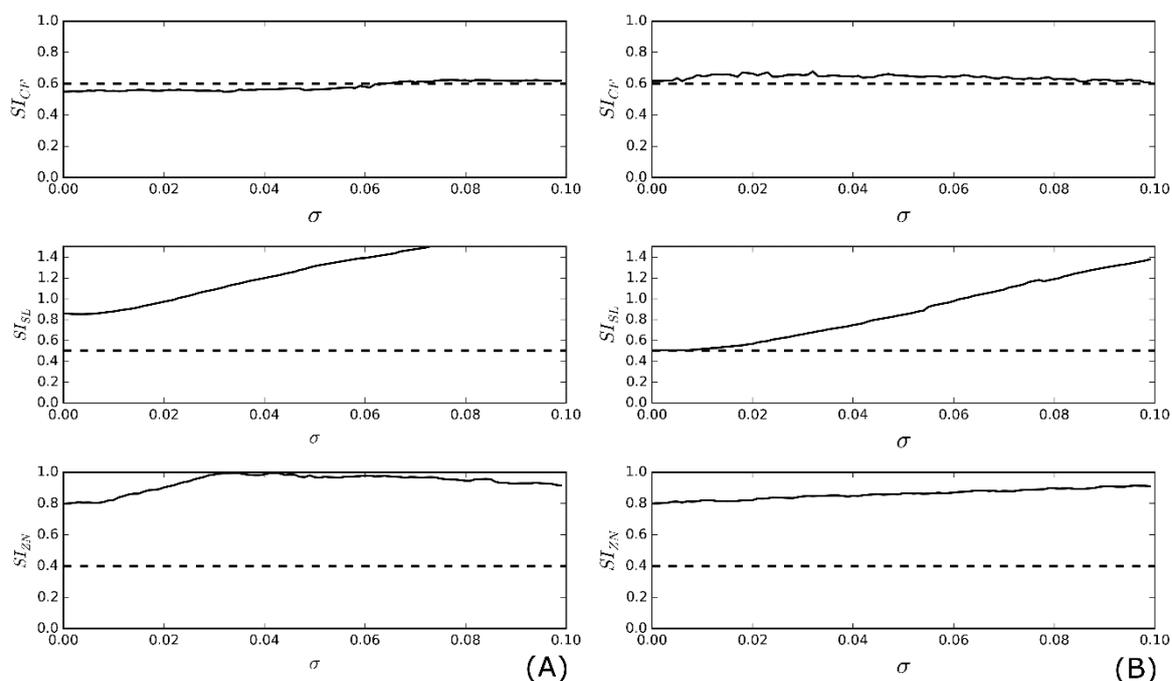


Figura 3.18: Índice de agarramento em função da variância do ruído para o método de ajuste de curva e para as técnicas propostas: (A) Antes do processamento de dados a (B) após o processamento de dados.

Análise do tempo morto.

Para a análise do tempo morto, todos os parâmetros para a terceira análise foram mantidos constantes e tempo morto variando de 0 a 1 θ/τ foi adicionado ao processo. Figura 3.19 ilustra a variação do índice de agarramento para o método de ajuste de curva e os dois métodos propostos. Como visto, o valor do índice de agarramento para todos os métodos decresce com o aumento do tempo morto devido à oscilação causada pelo

controlador para sistemas com tempo morto que tem características próximas a função senoidal. Os métodos de ajuste de curva e segmentação em zonas apresentam praticamente a mesma sensibilidade ao tempo morto enquanto o método da inclinação dos picos apresenta resultados pouco inferiores.

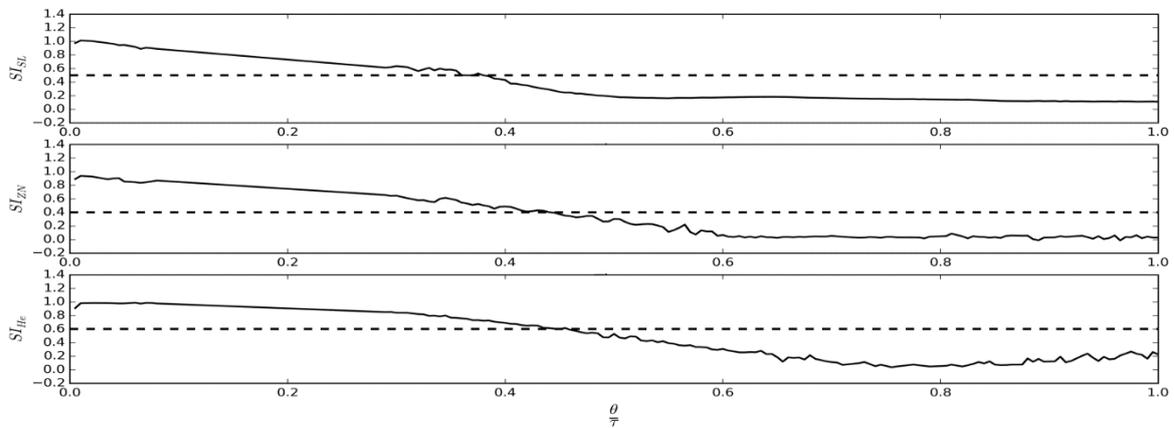


Figura 3.19: Sensibilidade ao tempo morto para o método de ajuste de curva e para as duas técnicas propostas (onde $S = 5$, $J = 3$, $slp1 = 0,005$, $slp2 = -0,01$, $cnp = 0$).

Análise para processos integradores

Processos integradores, como aqueles onde o nível é a variável controlada e a retirada se dá por uma bomba, possuem diferente dinâmica. Para este tipo de processo, a diferenciação do sinal para a detecção do agarramento é feita pelo sinal PV seguindo a mesma estratégia: sinal triangular indica a presença de agarramento e sinal senoidal a presença de distúrbio externo ou má sintonia do controlador. Para a avaliação das técnicas propostas para processos integradores, a terceira simulação foi reavaliada utilizando-se a função de transferência indicada pela Equação 3.4.

$$G(s) = \frac{k}{\tau \cdot s} \quad (3.4)$$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.13, como visto, não existe grande diferença para os métodos propostos, mas houve uma melhora no desempenho para o método de ajuste de curva. Como o sinal avaliado é o PV e o *setpoint* é mantido constante (para a terceira análise), não existe referência variável no sinal a ser analisado, assim, qualquer método pode ser aplicado com igual eficiência.

Tabela 3.13: Porcentagem de identificação correta para processos integradores.

Método	Ajuste de curvas	Incl. dos picos	Seg. em zonas
Resultados	99,0%	97,0%	97,0%

Análise da mínima amostragem

Para a análise da amostragem mínima requerida para a detecção pelos métodos propostos, as análises 1 e 2 foram refeitas para parâmetros constantes e amostragem variando de 5 a 30 dados por ciclo. O índice de agarramento para os dois métodos para sinais com e sem a presença de agarramento (respectivamente, análise 1 e 2) é mostrado na Figura 3.20.

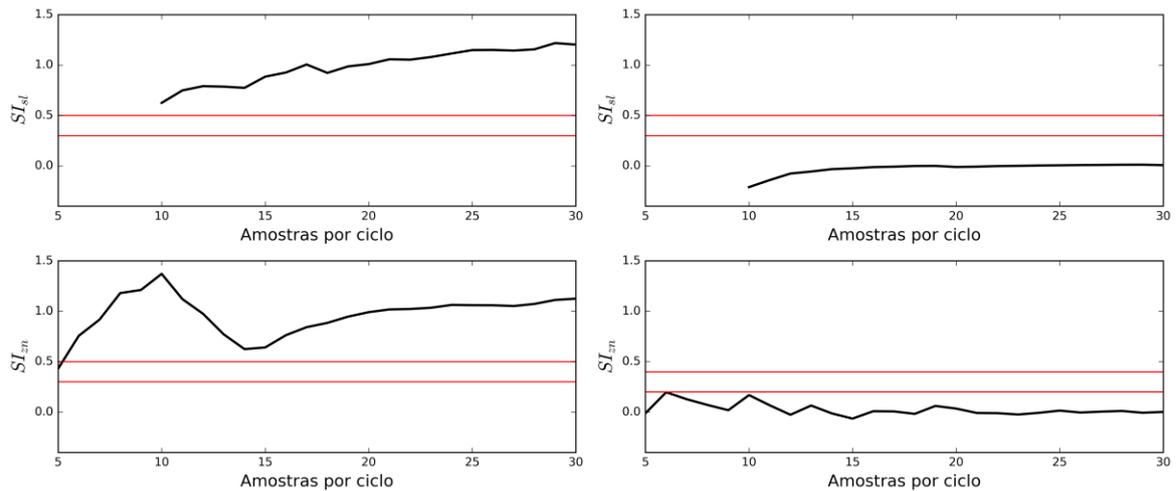


Figura 3.20: Índice de agarramento para diferentes amostragem: (A) e (B) Análise para o método de inclinação dos picos, respectivamente para os casos com e sem agarramento; (C) e (D) Análise para o método de segmentação em zonas, respectivamente para os casos com e sem agarramento. (onde $S = 5$, $J = 1$, $\tau = 0,2$, $K_p = 0,5$, $\tau_I = 1,66$).

Como observado, para o método de inclinação dos picos, o índice de agarramento se mantém adequado para toda a faixa analisada, mas para amostragem menor que 10 dados por ciclo o método não pode ser aplicado já que o único ponto dentro da região de avaliação é o pico ou o vale, ou seja, não existe pontos suficientes para a o cálculo da inclinação. Para o método de segmentação em zonas, houve variação no índice de agarramento, mas este se manteve na região adequada para toda a região analisada, com exceção da análise para 5 dados por ciclo. Dessa forma para a análise pelas metodologias propostas são necessários ao menos 10 e 6 dados por ciclos respectivamente para os métodos de inclinação dos picos e segmentação em zonas.

3.3 Considerações finais

Neste capítulo duas técnicas para o diagnóstico do agarramento em válvulas de controle para sinais com referência variável foram introduzidas. A principal ideia de ambos os métodos é a diferenciação da forma do sinal em triangular ou senoidal para sinais de saída do controlador (OP) ou da variável do processo (PV).

O primeiro método é baseado na inclinação dos picos do sinal. O valor médio da inclinação de cada segmento é comparado com a média obtida para o sinal padrão senoidal e triangular de mesma frequência que o sinal original. Para o segundo método, o sinal é segmentado em várias zonas e a densidade de pontos em cada zona é comparada com a densidade para o sinal padrão senoidal e triangular.

Inicialmente os dois métodos propostos foram confrontados com o método de ajuste proposto por He *et al.* (2007) para um grande número de cenários utilizando dados simulados. Erros do tipo 1 e tipo 2 foram analisados utilizando-se referência fixa. Os resultados encontrados são equivalentes para todos os métodos. Para a terceira e quarta análise, distúrbios são adicionados à malha de controle, sendo o primeiro uma malha SISO e o segundo uma malha cascata. Vários parâmetros para o distúrbio e agarramento são testados e o resultado corrobora para a validação dos métodos apresentados. Enquanto o

método de ajuste de dados detecta 75% dos casos, o método de segmentação detecta 88% e o baseado na inclinação dos picos detecta 99% dos casos analisados.

Simulações para casos especiais foram conduzidas para testar as técnicas propostas para diferentes condições. Para a análise da sensibilidade ao ruído, foi observado que o método de segmentação em zonas necessita do uso de filtros do tipo passa baixo para a remoção do ruído e o método de inclinação dos picos não é recomendado para os casos de forte presença de ruído. Para a análise do tempo morto, o índice de agarramento para as duas técnicas propostas assim como o método de ajuste de curvas decresce com o aumento do tempo morto praticamente na mesma proporção. Para a análise em processos integradores, os métodos propostos mostraram resultados semelhantes enquanto o método de ajuste de curva apresentou melhora no desempenho. Para a análise da amostragem mínima, foi definido que para a análise é necessário ao menos 5 e 10 dados por ciclo respectivamente para os métodos de inclinação dos picos e segmentação em zonas.

As técnicas propostas foram aplicadas para dados industriais e dados provenientes de Jelali e Scali (2010), novamente, os resultados demonstram as vantagens do método para detecção em caso de sinal com média variável.

Capítulo 4 – Pré-processamento de Sinais para o Diagnóstico do Agarramento

A presença de ruído e distúrbios externos não medidos torna necessário o uso de processamento de dados para a adequação do sinal a grande parte dos métodos de detecção do agarramento. O pré-processamento normalmente exige a utilização de filtros, cujos tipos e parâmetros dependem das características do distúrbio, ruído e do próprio sinal, sendo que muitas vezes são necessários testes e, por sua vez, a interação com o usuário, o que pode impossibilitar a automatização das técnicas de detecção de agarramento existentes. Na literatura, pouco se discute sobre o pré-processamento dos dados adequado para cada método. A Tabela 4.1 resume os problemas e as soluções adotadas para alguns dos métodos de detecção mais citados (segundo consulta própria).

Tabela 4.1: Problemas e soluções adotadas para o pré-processamento de dados em métodos convencionais de detecção do agarramento.

Métodos de Detecção	Problemas	Soluções Adotadas
Horch (1999)	Referência variável	Não abordada.
Singhal e Salsbury (2005)	Determinação dos zeros	Apresenta método (Salsbury e Singhal, 2010).
	Referência variável	Não abordado.
	Determinação dos picos	Filtro necessário.
	Obtenção do valor exato do zero	Não abordado.
He <i>et al.</i> (2007)	Determinação dos zeros	Utilização de filtros para remoção de ruído.
	Referência variável	Metodologia não abordada (feito automaticamente); Se distúrbio não senoidal, método pode falhar.
	Obtenção do valor exato do zero	Interpolação do valor anterior e posterior.
Yamashita (2006)	Ruído	Uso de filtros ou rede neural; Redução da amostragem (16 dados por ciclo) (Kano <i>et al.</i> , 2010).

O método apresentado por Horch (1999) utiliza a função de correlação cruzada entre o sinal proveniente do controlador (sinal OP) e do erro do processo (PV - SP). A presença de

ruído é amortecida por essa técnica, mas o distúrbio externo torna a média do sinal da correlação cruzada variável, portanto, a remoção da tendência é necessária para a correta avaliação pelo método.

Os métodos das áreas (Singhal e Salsbury, 2005) e ajuste de curva (He *et al.*, 2007) dividem o sinal em meio-ciclos limitados pelos zeros do sinal. A determinação dos zeros encontra três problemas para dados industriais: o ruído pode criar zeros adicionais, a média variável desvia o valor dos zeros e o valor exato do zero não existe para dados discretos. Para o último caso, o valor mais próximo pode ser escolhido, mas falha para sinais com pouca quantidade de dados por ciclo (i.e., amostragem insuficiente). A Figura 4.1 ilustra os três problemas relacionados à detecção dos zeros.

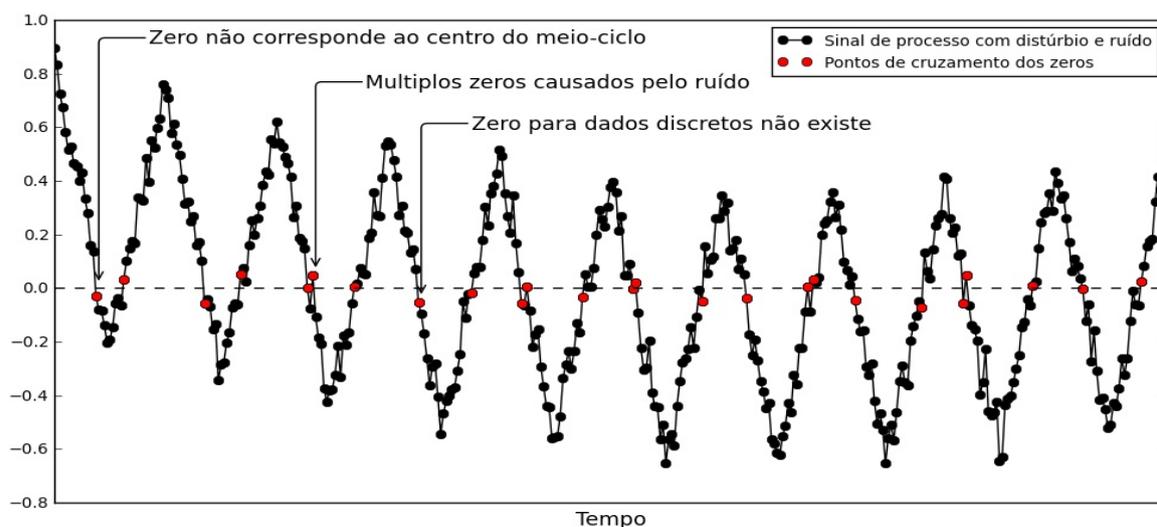


Figura 4.1: Ilustração dos problemas referentes a determinação dos zeros de sinal com ruído e distúrbio.

O método de Yamashita (Yamashita, 2006) obtém o sentido da variação para o sinal OP e do erro do processo, e a partir da sua combinação identifica o agarramento. Como o sentido é obtido a partir da diferença entre o valor atual e anterior, a presença de ruído influencia a análise.

Segundo Jelali e Scali (2010), a literatura já apresenta um número elevado de métodos de detecção do agarramento e a criação de novos não seria necessária. Por isso, pesquisas futuras devem ser direcionadas ao aprimoramento das técnicas já existentes. Com tal norte, o objetivo deste capítulo é estudar e criar metodologia para automatizar o pré-processamento de dados para o uso em métodos de detecção já existentes, visando aumentar a acuracidade da detecção do agarramento. O pré-processamento deve ser utilizado de acordo com a necessidade de cada método.

Este capítulo é dividido da seguinte forma: na primeira seção, é apresentada a metodologia criada para a remoção do excesso do ruído, identificação dos picos e vales, remoção da média variável e identificação dos zeros do sinal. A metodologia proposta é testada para quatro métodos de detecção do agarramento, primeiramente para dados simulados, na seção 2, e posteriormente para dados industriais, na seção 3. Na seção 4 são apresentadas as conclusões do presente capítulo.

4.1 Metodologia

Considerando a importância do pré-processamento de dados para a detecção do agarramento e a falta de estudos relacionados a essa área, nesta seção é proposta uma metodologia para a solução dos problemas especificados na Tabela 4.1, ou seja, remoção do excesso de ruído, identificação dos picos e vales, remoção da média variável e identificação dos zeros. O apêndice 3 deste trabalho apresenta uma revisão elementar sobre o processamento de sinais e filtros.

4.1.1 Remoção do excesso de ruído

A remoção do excesso de ruído é feita através de filtros do tipo passa-baixa. O uso desse tipo de filtro deve ser cuidadoso quando utilizado para a detecção do agarramento, pois, dependendo da frequência de corte escolhida, o sinal pode tornar-se muito suavizado, eliminando as características que definem o agarramento ou pouco suavizado, não eliminando o problema completamente. Para a automatização da remoção do ruído, é necessário que a técnica determine a frequência de corte adequada que minimize os problemas definidos anteriormente. Assim, nesta seção, será feita a análise do sinal para diferentes frequências de corte de modo a avaliar o efeito do uso do filtro na identificação do agarramento. Continuando a análise resumida na Seção 3.2.3.1., a Figura 4.2 mostra o espectro de sinais de forma senoidal, quadrada, triangular e dente de serra com 50 dados por ciclo, onde os três últimos são sinais característicos do agarramento.

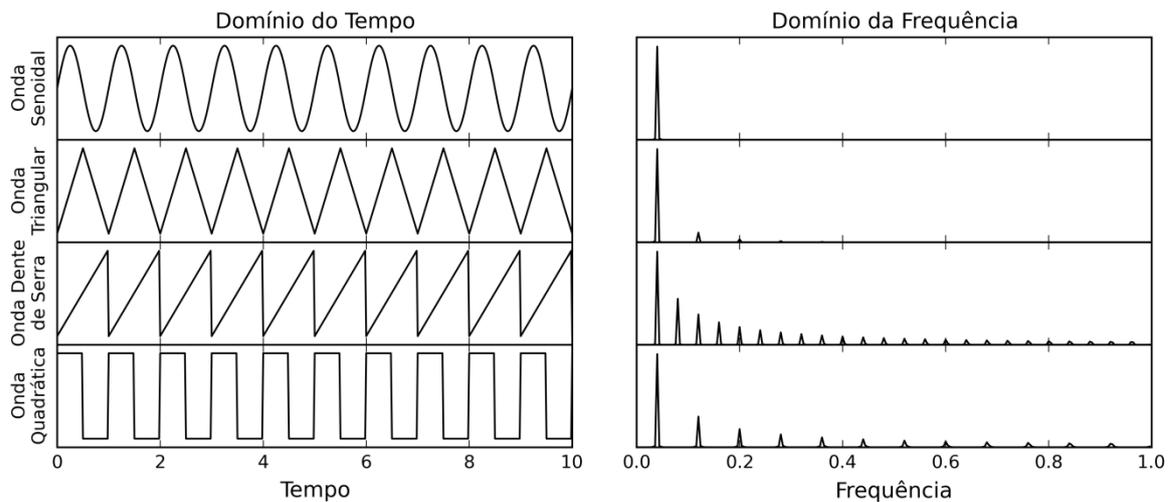


Figura 4.2: Resposta no tempo e em frequência para sinais do tipo senoidal, quadrada, dente de serra e triangular para sinais com 50 dados por ciclo.

A Figura 4.2 apresenta a frequência fundamental, que para todos os casos é 0,04 (frequência normalizada entre 0 e 1), e os harmônicos correspondentes a cada sinal, para sinais quadrados e triangulares existem apenas harmônicos ímpares enquanto que para o sinal dente de serra existem harmônicos pares e ímpares. Esses gráficos representam a importância da escolha adequada da frequência de corte do filtro, onde para frequências muito pequenas (abaixo da frequência do segundo harmônico) a curva resultante se aproxima de uma função senoidal, já que apenas a frequência fundamental é considerada. A Tabela 4.2 mostra o índice de agarramento (Equação 2.7) utilizando o método de ajuste de curvas para diferentes número de harmônicos para curva do tipo triangular. Para a remoção dos harmônicos de ordem superior foi utilizado filtro passa-baixa do tipo *Butterworth* de quarta ordem com a frequência de corte localizada entre os harmônicos.

Para aumento da precisão, novos sinais foram gerados com 1000 dados por ciclo, para a remoção do efeito da defasagem, o filtro foi aplicado nos dois sentidos.

Tabela 4.2: Índice de agarramento para método de ajuste de curvas em função do número de harmônicos para sinal triangular.

Harmônico	Freq. Fundamental	3°	5°	7°	9°	11°
Frequência de corte ($1 / \omega_{fund.}$)	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5	11,5
SI	0,000	0,771	0,943	0,978	0,980	0,994

Como pode ser observado na Tabela 4.2, a utilização apenas da frequência fundamental resulta em onda puramente senoidal (índice de agarramento igual a zero), para a utilização de pelo menos dos cinco primeiros harmônicos, o índice é igual a 0,943, garantindo a identificação eficiente do agarramento.

Normalmente a forma do sinal com agarramento não é exatamente triangular, existindo um desvio que tende a tornar a curva próxima a um sinal do tipo dente de serra. A Tabela 4.3 mostra a resultado utilizando a mesma análise para esse tipo de sinal, mas desta vez os harmônicos pares foram também analisados. Como pode ser observado, a utilização de pelo menos três harmônios é suficiente para manter o índice acima de 0,95.

Tabela 4.3: Índice de agarramento para método de ajuste de curvas em função do número de harmônicos para sinal do tipo dente de serra.

Harmônico	Freq. Fundamental	2°	3°	4°	5°	6°
Frequência de corte ($1 / \omega_{fund.}$)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
SI	0,00	0,843	0,960	0,973	0,978	0,983

Para o sinal do tipo quadrado a mesma sistemática foi aplicada, mas desta vez o método de detecção utilizado foi o relé (Equação 2.6) que identifica ondas desse formato, sendo que índices acima de zero indicam a presença de agarramento. O resultado é apresentado na Tabela 4.4 e como pode ser observado, novamente, a presença de cinco harmônicos é suficiente e representa forte presença de agarramento.

Tabela 4.4: Índice de agarramento para método relé em função do número de harmônicos para sinal do tipo onda quadrada.

Harmônico	Freq. Fundamental	3°	5°	7°	9°	11°
Frequência de corte ($1 / \omega_{fund.}$)	2	4	6	8	10	12
SI	-1,000	0,133	0,354	0,452	0,458	0,462

Dessa maneira, para a remoção do excesso do ruído em sinais onde o agarramento é analisado, será utilizado filtro do tipo passa-baixa com frequência de corte igual a 5,5 vezes a frequência fundamental já que este valor é aceitável para os três padrões de onda analisados. A frequência fundamental pode ser identificada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Para o segundo, a frequência fundamental normalmente é representada pelo pico de maior amplitude no espectro do sinal.

4.1.2 Detecção de picos e vales, remoção da referência variável e identificação dos zeros.

Além do ruído, outro grande problema encontrado em dados industriais é a presença da referência variável. Encontrada principalmente em sistemas que apresentam controle do tipo cascata ou com a presença de distúrbio externo, a referência variável desvia os valores dos zeros no domínio do tempo e na correlação entre dois sinais. Além disso, os valores dos zeros podem ser afetados pela presença de ruído e pela pequena amostragem. Visando minorar tal impacto, essa seção apresenta a metodologia para a correção desses problemas.

Determinação dos picos e vales

Picos e vales em sinais suaves podem ser facilmente identificados pela mudança do sinal da primeira derivada, o que não é válido para sinais ruidosos. A eliminação do ruído pela utilização de filtro é uma alternativa, mas, para a remoção de todos os picos e vales causados pelo ruído, é necessário o uso de filtro de frequência de corte muito baixa suavizando excessivamente o sinal e prejudicando a detecção do agarramento. Dessa forma, esta técnica objetiva identificar os picos e vales do sinal original sem a remoção completa do ruído, cujo algoritmo aqui proposto é apresentado subsequentemente:

1. Dados de saída do controlador (OP) ou da variável do processo (PV) são coletados;
2. O sinal é suavizado pela utilização de filtro, então a segunda derivada do sinal filtrado é calculada e os valores de cruzamento do zero são localizados;
3. O sinal original (antes de ser suavizado) é dividido em janelas limitadas pelos valores dos zeros encontrados anteriormente;
4. Finalmente, os valores extremos (valores de máximo ou mínimo) de cada janela são obtidos, correspondendo aos picos e vales do sinal.

Para a suavização do sinal, o filtro é do tipo *Butterworth* de quarta ordem é aplicado em ambas as direções de forma a eliminar o efeito da defasagem. A frequência de corte do filtro é definida como sendo a frequência de oscilação do sinal, que por sua vez é representada por um pico na densidade espectral. Por consequência, o sinal resultante é uma função aproximadamente senoidal de mesma frequência que o sinal original com a presença do distúrbio.

Para casos gerais, o pico mais elevado corresponde à frequência de oscilação, mas para a presença de distúrbio pode haver um pico mais elevado para frequências próximas à zero. De modo a eliminar a influência do distúrbio, a densidade espectral é dividida em segmentos onde apenas valores acima de dois desvios padrões são considerados de modo a eliminar a influência do ruído e dos harmônicos. Finalmente, o valor máximo do segmento de maior frequência é considerado a frequência de oscilação e, por sua vez, a frequência de corte. Como exemplo, a Figura 4.3 ilustra a densidade espectral para um sinal

fortemente afetado por distúrbio: o espectro foi dividido em 2 segmentos definidos pelo desvio padrão e a frequência de oscilação de aproximadamente 0,018 identificada para o pico do segmento de maior frequência.

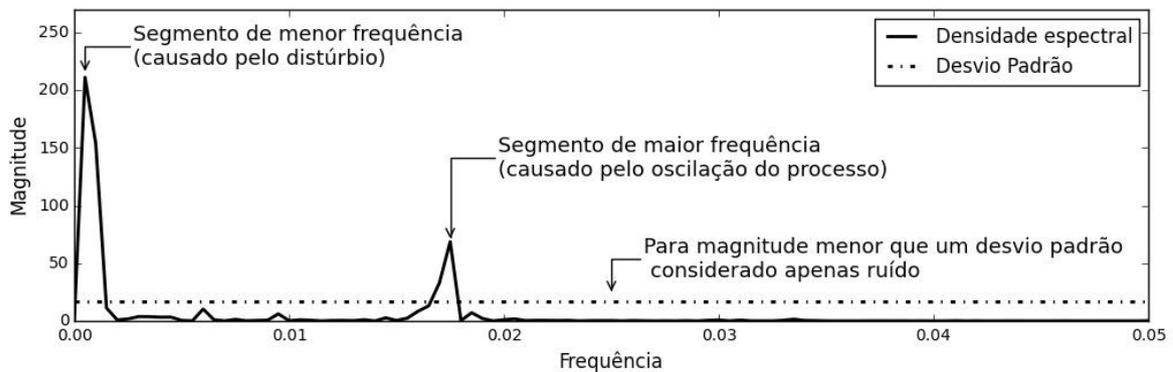


Figura 4.3: Identificação da frequência de oscilação/corte através da densidade espectral para o sinal com distúrbio elevado.

A Figura 4.4 demonstra o passo a passo do procedimento para a identificação dos picos e vales, onde um sinal ruidoso de forma quadrada foi utilizado.

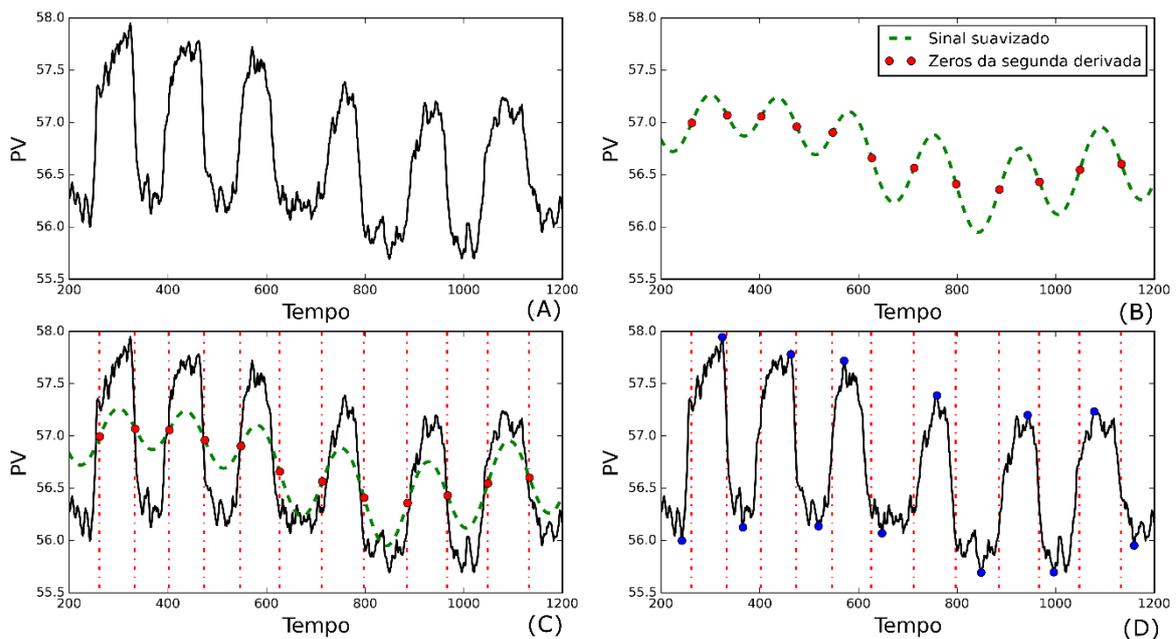


Figura 4.4: Identificação dos picos e vales para um sinal ruidoso de forma quadrada: (A) dados PV são coletados; (B) Sinal suavizado pela utilização de filtro e pontos de inflexão (zeros da segunda derivada) são localizados; (C) Divisão do sinal original em janelas limitadas pelos pontos de inflexão do sinal filtrado; (D) localização dos pontos extremos para cada janela. (dados fornecidos por Jelali e Scali, 2010).

A metodologia depende do valor da frequência de oscilação do sinal para a definição da frequência de corte, o que cria problema para sinais com frequência de oscilação variável, restringindo a aplicação do método para sinais onde a oscilação é regular. A regularidade pode ser testada através do método de detecção de oscilação utilizado neste trabalho e

proposto por Thornhill *et al.* (2003). Apesar desta restrição, a metodologia continua sendo aplicável para a maioria dos casos onde o agarramento está presente.

Remoção da tendência

A tendência pode ser facilmente removida pela utilização de filtros do tipo passa-alta. Para isso, basta utilizar como frequência de corte valor abaixo da frequência fundamental, mas a sua utilização provoca grande distorção no sinal original, principalmente para sinais com poucos períodos (frequência fundamental próxima a zero). Outra forma de remoção da tendência é através da utilização de ajustes, principalmente lineares, que não é válido para a maior parte dos sinais industriais, onde a tendência tem comportamento dificilmente expresso por expressão matemática.

A partir dos picos e vales encontrados anteriormente, a tendência pode ser facilmente removida. Para isso, são feitos dois ajustes utilizando-se interpolação *spline* de terceira ordem: um para os picos e outro para os vales. O valor médio dos ajustes é a tendência do sinal. Esse processo é semelhante ao utilizado por Srinivasan *et al.* (2007) com a diferença que apenas os valores dos picos e vales da oscilação principal são utilizados na interpolação. A utilização da interpolação de terceira ordem causa problema para a extrapolação, por isso é aconselhável manter os valores extremos constantes. A Figura 4.5 mostra os ajustes e a tendência do sinal.

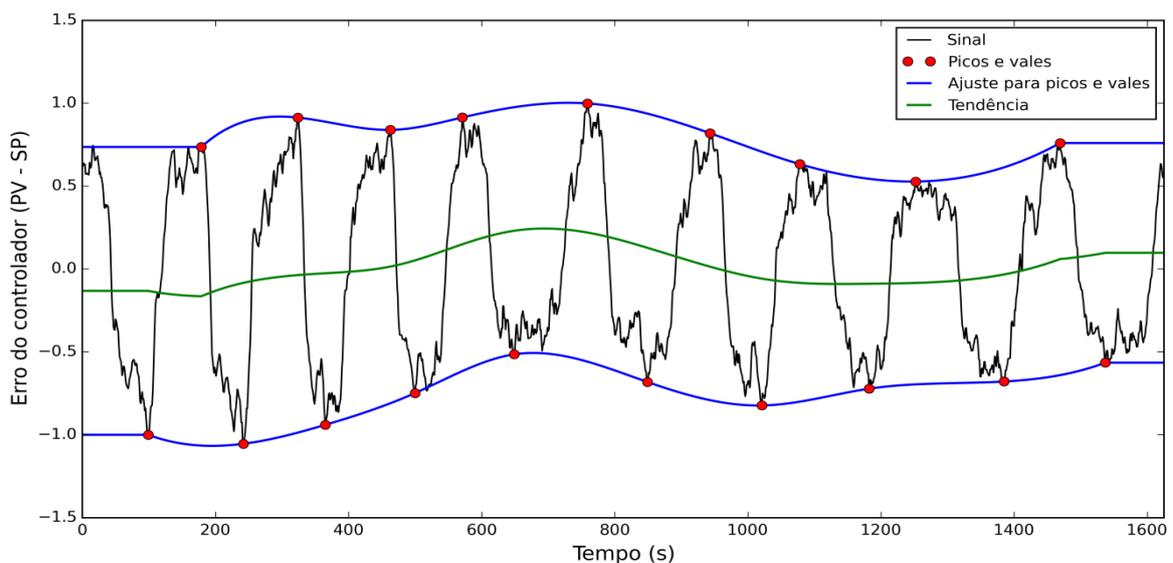


Figura 4.5: Determinação da tendência de sinal afetado por distúrbio.

Determinação dos zeros

A eliminação da média variável é apenas o primeiro passo para a identificação dos zeros do sinal. Além do distúrbio, o ruído e a pequena amostragem do sinal influenciam negativamente a identificação. Alguns zeros do sinal podem ser causados pela presença de ruído e, por isso, devem ser desconsiderados para a análise do agarramento. Novamente, sabendo-se a localização dos picos e vales do sinal, os zeros podem ser facilmente identificados.

Um zero deve ser sempre seguido de um pico ou vale, que por sua vez, deve ser seguido de outro zero, se houver mais de um zero consecutivo, então existe zero causado pelo ruído. O número de zeros entre um pico e vale é sempre um número ímpar, independente

da presença ou não de ruído, então, para este método, apenas o valor da mediana (valor central) será considerado.

O terceiro e último problema relacionado à identificação dos zeros é causado pela taxa de amostragem, que se muito pequena em relação à frequência de oscilação, pode não encontrar valores próximos de zero. Esse problema é facilmente corrigido pela utilização de interpolação linear entre o ponto anterior e posterior ao cruzamento do zero, como propostos por He *et al.* (2007). O procedimento completo é ilustrado na Figura 4.6.

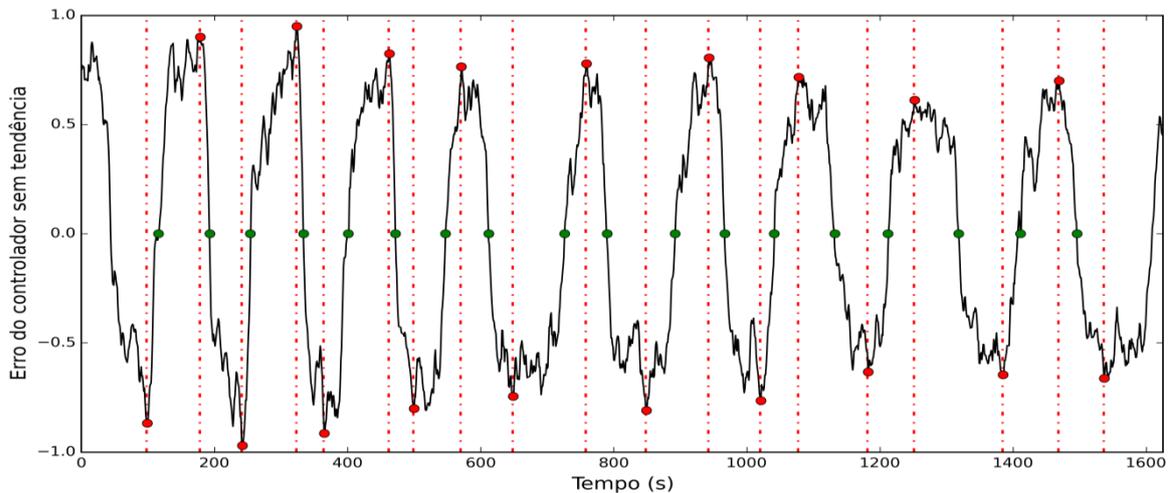


Figura 4.6: Determinação dos zeros para sinal com tendência removida.

4.2 Estudo de caso para dados simulados

Adotando o mesmo procedimento do Capítulo 3, os dados são gerados com o auxílio do Matlab para posterior análise utilizando as implementações em Python. Novamente, o modelo do agarramento adotado é o proposto por Kano *et al.* (2004). As funções de transferência dos processos e controladores são também provenientes do trabalho de Kano *et al.* (2004), sendo para processo do tipo autorregulatório, a função de transferência é representada pela Equação 4.1.

$$G_p = \frac{1}{0.2s+1} \quad (4.1)$$

e a função de transferência do controlador pela Equação 4.2.

$$G_c = 0.5 \left(2 + \frac{1}{0.3s} \right) \quad (4.2)$$

Para processo do tipo integrador, a função de transferência utilizada foi a apresentada pela Equação 4.3:

$$G_l(s) = \frac{1}{15s} e^{-s} \quad (4.3)$$

e o controlador possui a função de transferência da Equação 4.4.

$$G_c(s) = 3 \left(1 + \frac{1}{30s} \right) \quad (4.4)$$

O sinal de ruído é criado a partir de um sinal randômico de distribuição normal. O sinal de distúrbio é criado através de outro sinal randômico modificado pela função de transferência apresentada pela Equação 4.5.

$$G_d = \frac{1}{1000s+1} \quad (4.5)$$

Os sinais de ruído e distúrbio serão adicionados após a simulação diretamente ao sinal OP, PV ou senoidal, dependendo da análise, procedimento este que não é adequado, mas será adotado pelos seguintes motivos:

- Permite avaliar a aplicabilidade da metodologia para o mesmo sinal com diferentes níveis de distúrbio e ruído, assim será possível avaliar a detecção do agarramento em função da magnitude do ruído e do distúrbio;
- Elimina seções de frequência variável, onde a metodologia para a detecção dos picos e vales pode acarretar em resultados incorretos.

O grau de distúrbio e de ruído será medido através da variância ou desvio padrão dos respectivos sinais e a adição será feita ao sinal OP, PV ou senoidal normalizado (amplitude máxima igual a um). A Figura 4.7 ilustra o procedimento de adição do distúrbio de desvio padrão igual a 0,3, e como observado, os sinais resultantes são semelhantes aos obtidos em plantas reais, como o sinal apresentado pela Figura 4.4.

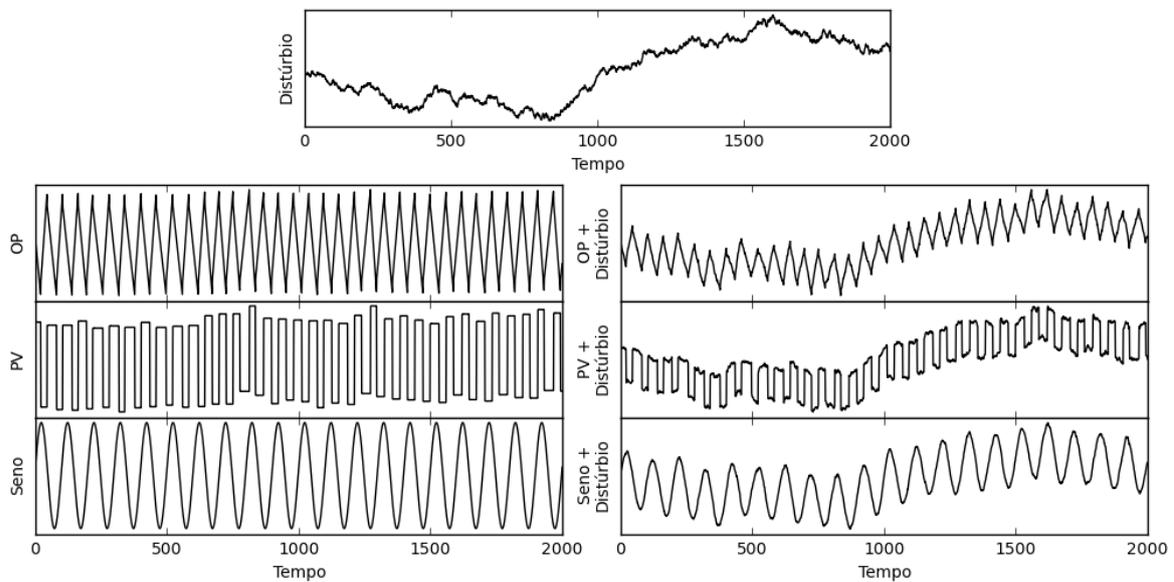


Figura 4.7: Procedimento de adição de distúrbio aos sinais OP e PV.

Durante os testes, serão utilizados 10 padrões (D1, D2, ..., D10) de distúrbio gerados a partir de diferentes sinais randômicos. Os padrões são apresentados na Figura 4.8.

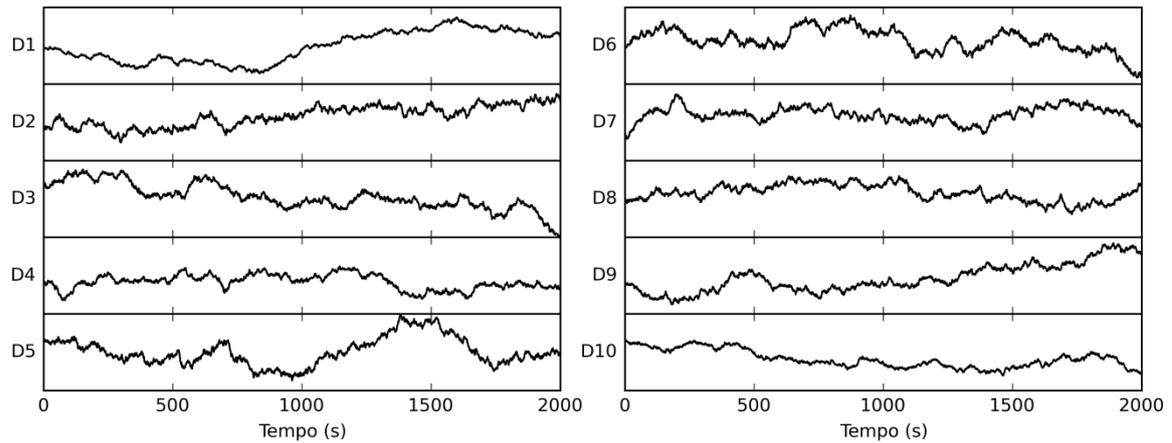


Figura 4.8: Padrões de distúrbio adicionados ao sinal OP e/ou PV para a análise da metodologia proposta.

Para os métodos de Horch e Yamashita, onde os sinais OP e PV são analisados, o distúrbio e o ruído são adicionados como ilustrado pelo diagrama da Figura 4.9 onde C é a função de transferência do controlador, ou seja, a Equação 4.2, PV_P e OP_P são os sinais padrões, PV_N e OP_N os sinais após a adição de distúrbios e ruídos.

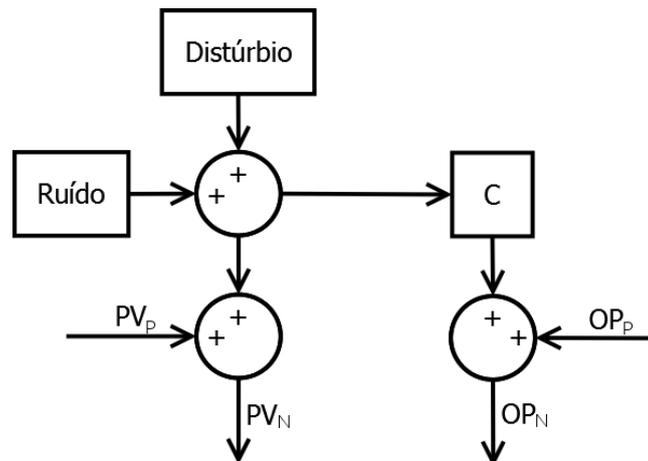


Figura 4.9: Construção do sinal OP a partir do sinal PV para análise pelos métodos de correlação cruzada e de Yamashita

Durante a análise de todos os métodos de detecção, os parâmetros de agarramento S e J permanecerão constantes e respectivamente iguais a 5 e 1. A variação dos parâmetros do agarramento resulta, basicamente, na variação da amplitude do sinal e não na forma, como a adição do distúrbio e ruído é feita ao sinal normalizado, os parâmetros pouco influenciam a análise.

As análises serão conduzidas de modos diferentes para cada método de detecção, objetivando avaliar a influência apenas dos parâmetros que interferem no índice de agarramento em cada técnica, dessa forma, a análise é dividida em seções, uma para cada método. Cada seção discute:

- Problemas relacionados à identificação, parâmetros que influenciam o índice de agarramento e o pré-processamento convencional utilizado;
- Como são gerados os dados para análise;
- Como é feita a análise do pré-processamento;
- Resultados e pré-processamento ideal.

4.2.1 Avaliação do método de detecção por correlação cruzada

Para o método de Horch (1999), a presença de distúrbio causa variação na referência da função de correlação o que compromete a análise do agarramento. O pré-processamento convencional para essa técnica é a remoção da tendência do sinal pelo uso de filtro passa-alta ou por algum tipo de ajuste de curva. O efeito do ruído não é avaliado para o método das correlações cruzadas, já que o efeito desse é amortecido pelo cálculo da correlação, dessa forma, apenas a influência da referência variável será analisado.

Para a análise da metodologia para o pré-processamento de dados, os 10 padrões de distúrbio com variância igual a [0, 0,001, 0,002, ..., 0,04] foram adicionados ao sinal PV e OP, de acordo com o diagrama da Figura 4.9. Processos do tipo autorregulatório com e sem a presença de agarramento foram considerados, sendo assim, foram gerados 800 pares de sinais. Não é feita a avaliação para processos do tipo integrador, já que o método não é aplicável a esse tipo de processo.

A Figura 4.10 apresenta um exemplo de sinal gerado para análise, como visto, a referência variável é evidente para o sinal OP.

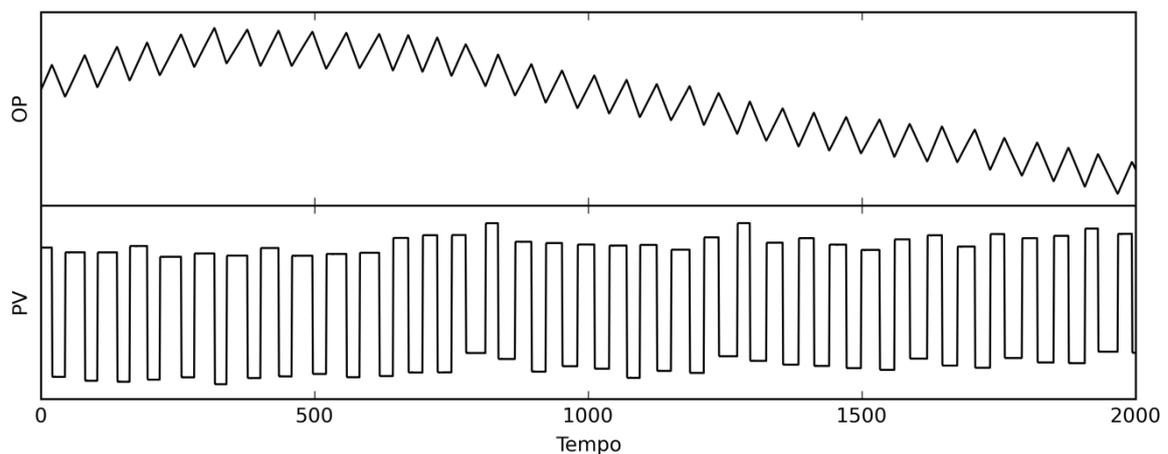


Figura 4.10: Sinais OP e PV gerados para a análise para o método de Horch, onde o padrão de distúrbio D5 de variância 0.03 foi utilizado.

Os testes para o pré-processamento foram conduzidos de três formas: sem o uso de qualquer técnica de pré-processamento de dados, uso da metodologia proposta para a remoção da tendência apenas no sinal OP e uso da metodologia em ambos os sinais. O uso da metodologia apenas ao sinal OP é válido para os casos onde o *setpoint* é mantido constante e não é observada a referência variável no sinal PV. O resultado para os dois índices de agarramento para o método das correlações cruzadas ($\Delta\delta$ e $\Delta\tau$) é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Variação do índice de agarramento para o método das correlações cruzadas utilizando a metodologia proposta para a remoção da referência variável.

		$\Delta\delta$				$\Delta\tau$			
		Mín.	Máx.	Média	Var.	Mín.	Máx.	Média	Var.
Pré-processamento									
Sem agar.	Sem pré-processamento	0.002	0.002	0.002	0,000	0.040	0.080	0.054	0.010
	Apenas no sinal OP	0,000	0.005	0.002	0.001	0,000	0.080	0.040	0.019
	Em ambos os sinais	0,000	0.004	0.001	0.001	0.000	0.091	0.042	0.021
Com agar.	Sem pré-processamento	0.552	0.999	0.888	0.090	0.8181	1,000	0.980	0.039
	Apenas no sinal OP	0.899	0.927	0.917	0.005	1,000	1,000	1,000	0,000
	Em ambos os sinais	0.918	0.929	0.922	0.002	1,000	1,000	1,000	0,000

A análise comprova a maior variabilidade em ambos os índices de agarramento onde o pré-processamento não é utilizado, principalmente aos sinais onde existe a presença de agarramento. Mesmo assim, todos os índices encontrados estão dentro da faixa correta de identificação.

A Figura 4.11 mostra o sinal que obteve pior resultado para o caso com agarramento sem o uso de pré-processamento Na Figura 4.11(A), são apresentados respectivamente os sinais OP e PV padrões não afetados por qualquer distúrbio, os sinais afetados pelo distúrbio e, finalmente, os sinais após a remoção da referência variável pela metodologia, na Figura 4.11(B), a correlação cruzada para os três pares OP-PV.. Como observado, a linha para o sinal da correlação para os casos sem a presença de distúrbio e com a presença de distúrbio e utilização do pré-processamento estão sobrepostas, o valor do índice $\Delta\delta$ foi de, respectivamente, 0,918 e 0,899, para o índice $\Delta\tau$ o valor encontrado foi igual a 1 para ambos os casos. A correlação para o caso com distúrbio e sem a utilização do pré-processamento deslocou a curva para cima, tornando o índice $\Delta\delta$ igual a 0,552 e o índice $\Delta\tau$ igual a 0,823. Assim, a remoção da referência variável é recomendada para casos com forte presença de distúrbio, caso contrário, a influência no índice de agarramento deve ser pequena, não interferindo no resultado final.

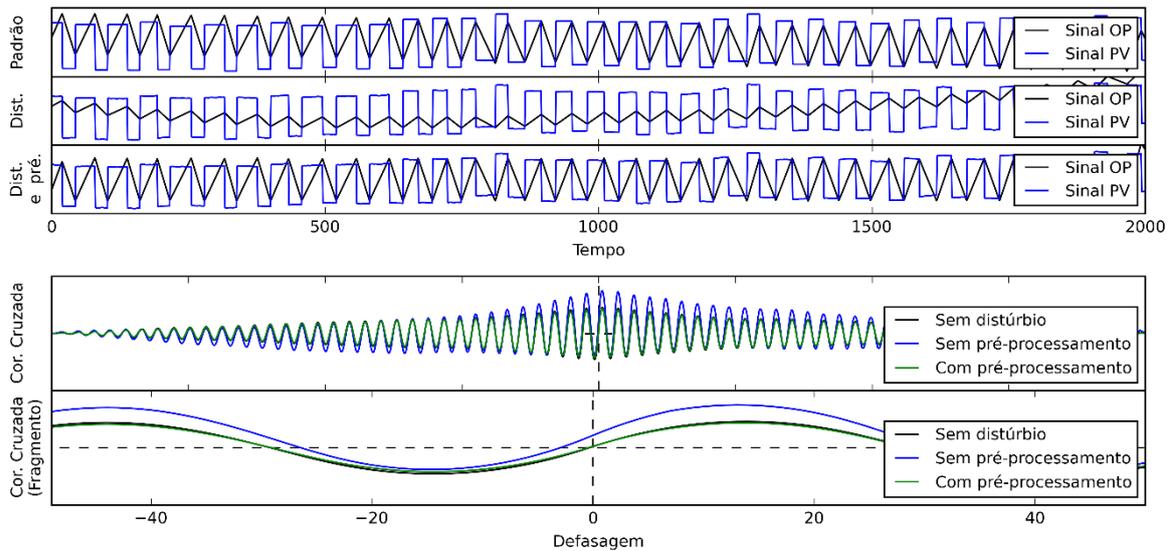


Figura 4.11: Aplicação do método da correlação para sinal sem distúrbio, com distúrbio não utilizando o pré-processamento e com distúrbio utilizando o pré-processamento utilizando o quarto padrão de distúrbio com variância igual a 0,04.

4.2.2 Avaliação para métodos com fragmentação em meio-ciclos

Os métodos de ajuste de curva e das áreas dependem da fragmentação correta do sinal em meio-ciclo. Deste modo, o pré-processamento visa a remoção da tendência e do ruído excessivo do sinal de forma a identificar corretamente os zeros. O procedimento convencional é a remoção do ruído através da utilização de filtros passa-baixa e remoção da tendência por ajuste linear. A utilização de filtro, como dito, pode depender da interação com o usuário e a remoção da média variável por ajuste linear nem sempre resolve completamente o problema. Para corroborar tal afirmação, a Figura 4.12 apresenta o sinal OP padrão com a presença de agarramento, adição do distúrbio (padrão 9) de desvio padrão 0,5 e ruído de variância 0,04. Como pode ser observado, a remoção da tendência por ajuste linear pouco corrigiu o sinal. Para melhores resultados, a tendência poderia ser removida por ajuste de diferentes funções (função de segunda ordem ou senoidal, por exemplo) ou pela utilização de apenas parte do sinal para a análise, mas ambas as alternativas podem requerer a interação com o usuário.

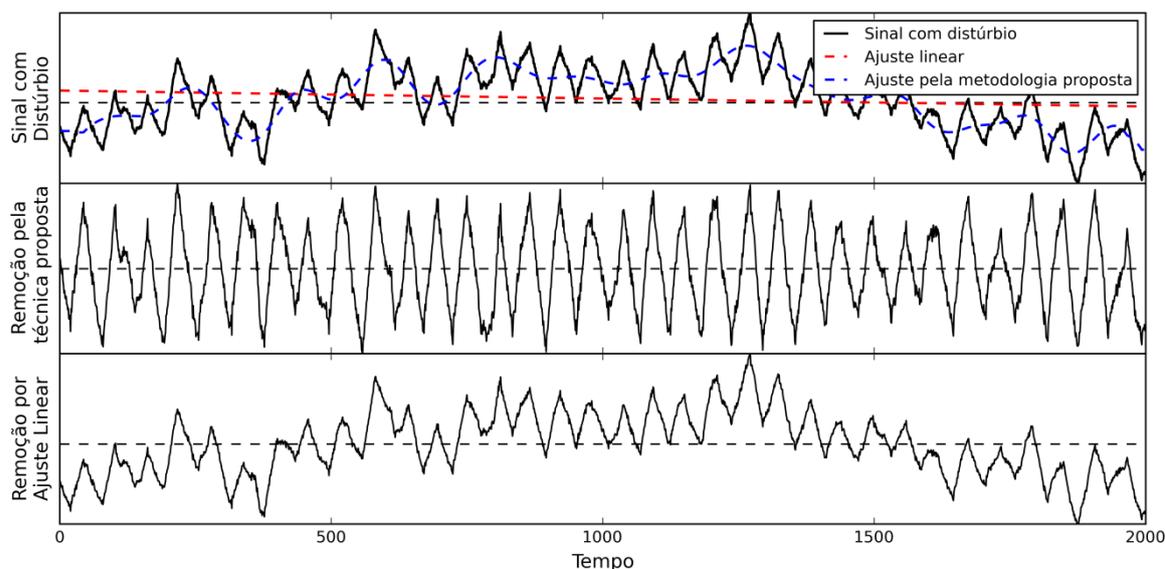


Figura 4.12: Aplicação da metodologia para caso com forte distúrbio e comparação entre a remoção da tendência por ajuste linear e através da metodologia proposta.

Avaliação para o método de ajuste de curva

Para a análise do pré-processamento ao método de ajuste de curvas, a metodologia proposta foi aplicada para processos do tipo autorregulatório, integrador e para sinal senoidal. Foram utilizados os 10 padrões de distúrbio apresentados com desvio padrão igual a $[0, 0,05, 0,1, \dots, 0,5]$ e sinal de ruído de distribuição normal de variância igual a $[0, 0,005, 0,01, \dots, 0,05]$.

Os testes para o pré-processamento foram executados utilizando o pré-processamento de quatro formas diferentes: sem o uso do pré-processamento, utilizando apenas a metodologia para remoção do excesso de ruído, utilizando apenas a metodologia para a remoção da tendência e identificação dos zeros e, finalmente, utilizando toda a metodologia proposta.

A Tabela 4.6 apresenta o resultado para a aplicabilidade dos sinais ao método de ajuste de curva após as quatro diferentes formas de uso do pré-processamento. O sinal é considerado não apto a ser analisado devido à presença de ruído quando existe mais de um zero entre um pico e vale ou vice-versa e considerado não apto a ser analisado devido à presença de referência variável quando o sinal é deslocado para cima ou para baixo da linha zero de modo que algum meio-ciclo apresente menos de 10 dados.

Tabela 4.6: Comparação do resultado para diferentes tipos de pré-processamento para o método de ajuste de curvas.

Pré-processamento	Aplicável	Zeros causados por ruído	Média Variável	Ambos os problemas
Sem pré-processamento	404	821	554	1851
Filtro	1232	0	2083	315
Identificação dos zeros	3599	0	31	0
Filtro + Identificação dos zeros	3630	0	0	0

Como observado, a metodologia foi capaz de remover o excesso de ruído de todos os sinais estudados. Vale ressaltar que os sinais gerados apresentam frequência de oscilação praticamente constante, requisito para a aplicação da metodologia, caso contrário, a eficiência seria reduzida.

Considerando o sinal após a remoção da referência variável e identificação dos zeros, a influência da remoção do excesso de ruído no índice de agarramento para o método de ajustes de curva foi avaliada. A Figura 4.13 apresenta os resultados para os processos do tipo autorregulatório, integrador e sem a presença de agarramento para dois casos: utilizando e não utilizando a metodologia para a remoção do excesso de ruído. O valor apresentado é a média do índice de agarramento para o método de ajuste de curva em função do desvio padrão do distúrbio e da variância do ruído para os 10 padrões de distúrbio.

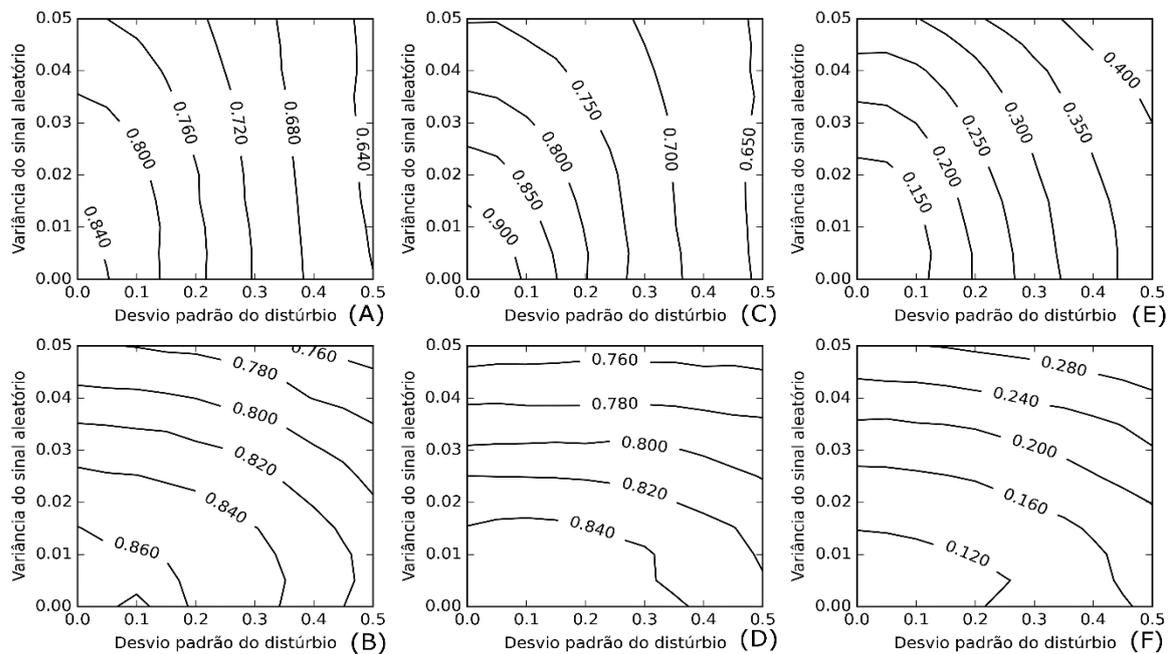


Figura 4.13: Índice de detecção para o método de ajuste de curva em função do desvio padrão do distúrbio e da variância do ruído utilizando a metodologia proposta para: (A) Processo auto-regulatório sem a pré-filtragem; (B) Com a pré-filtragem; (C) Processo integrador sem a pré-filtragem; (D) Com a pré-filtragem; (E) Sinal seno sem a pré-filtragem; (F) Com a pré-filtragem.

Sabendo que o índice para o método do ajuste de curva deve ser maior que 0,6 para indicar a presença de agarramento e menor que 0,4 para indicar outra causa de oscilação, através da Figura 4.13 é possível concluir que o excesso de ruído interfere nos ajustes das curvas, fazendo que o índice de agarramento tenda a 0,5 com o aumento da magnitude do ruído. A utilização do filtro demonstrou melhora nos resultados, onde a variação do índice do agarramento foi mais suave com o aumento da magnitude do ruído e do distúrbio. Ainda, é interessante notar que para a região onde não existe a presença de ruído e distúrbio (região inferior esquerda para todos os gráficos) o índice de agarramento para a análise com e sem a utilização de filtro resultou praticamente no mesmo resultado, indicando que não houve suavização excessiva do sinal pelo uso do filtro.

A metodologia aplicada apresentou resultados semelhantes tanto para processos do tipo autorregulatório como para processos do tipo integrador, o que é válido, já que o sinal analisado para ambos os processos apresenta mesma forma (forma triangular).

Avaliação para o método das áreas

Para a geração dos dados, o valor de constante de tempo (τ) da Equação 4.1 foi aumentado de 0,2 para 10, de modo que o sinal possuísse forma mais adequada para a identificação do agarramento por este método. Este procedimento foi considerado, pois a análise pretende testar o pré-processamento para sinais ruidosos e com distúrbio e não a eficiência do método de detecção. O método não é aplicável para processos do tipo integrador, assim serão analisados apenas processos autorregulatórios e sinais senoidais.

A análise do pré-processamento foi conduzida da mesma forma que o método de ajuste de curva, mas o sinal utilizado para este método é o erro do controlador (PV - SP).

A Tabela 4.7 apresenta a aplicabilidade do sinal ao método de detecção, da mesma forma feita para o método de ajuste de curvas, os resultados demonstram a eficiência da técnica proposta.

Tabela 4.7: Comparação do resultado para diferentes tipos de pré-processamento para o método das áreas.

Pré-processamento	Aplicável	Zeros causados por ruído	Média Variável	Ambos os problemas
Sem	349	544	296	1231
Filtro	891	0	1272	257
Identificação dos zeros	2408	0	12	0
Filtro + Identificação dos zeros	2420	0	0	0

A Figura 4.14 ilustra os resultados utilizando a metodologia proposta aos sinais simulados com a utilização de filtro de frequência de corte 5,5 vezes a frequência fundamental (frequência de oscilação) e sem a utilização de filtro.

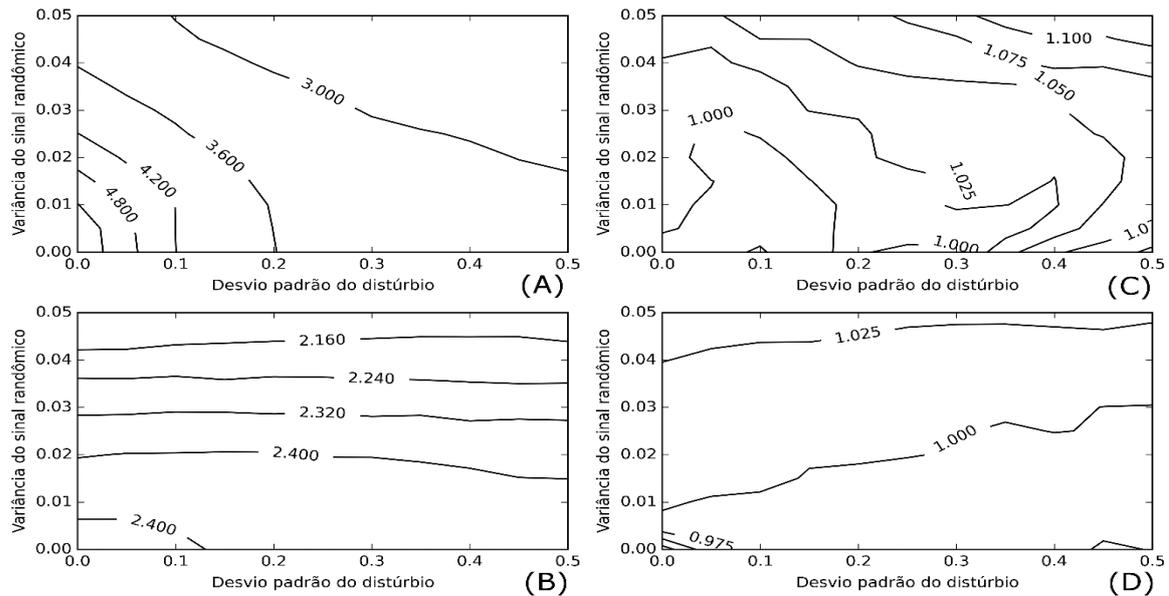


Figura 4.14: Índice de detecção para o método das áreas em função do desvio padrão do sinal de distúrbio e da variância do sinal de ruído utilizando a metodologia proposta para: (A) Processo auto-regulatório sem a pré-filtragem; (B) Com a pré-filtragem; (C) Sinal seno sem a pré-filtragem; (D) Com a pré-filtragem.

Sabendo que para o método das áreas, o índice de agarramento deve ser maior que $1 + \delta$ (onde δ é um limite e será considerado constante e igual a 0,3) para indicar a presença de agarramento e aproximadamente igual a 1 para indicar outra causa de oscilação. Pela Figura 4.14 é observado que a identificação do agarramento foi correta para todos os casos analisados, independente do uso do filtro ou não. Novamente, o uso do filtro garante a menor variabilidade do índice do agarramento com o aumento da magnitude do ruído e do distúrbio, mas, como observado para a análise do processo do tipo autorregulatório, o índice é fortemente reduzido devido à suavização da curva pelo uso do filtro.

4.2.3 Avaliação do método de detecção pelo método de Yamashita

O pré-processamento para o método de Yamashita visa à remoção do efeito do ruído que é amplificado pela diferenciação do sinal, já que o sentido de deslocamento no gráfico MV(OP) é obtido através da diferença entre um ponto e o ponto anterior. O procedimento convencional é a utilização de filtro passa-baixa para a remoção do ruído e, para os casos onde a frequência de oscilação é conhecida, a diminuição da amostragem, que, segundo Kano *et al.* (2010), deve ser de aproximadamente 16 dados por ciclo.

Para a análise, dois sinais PV foram gerados com taxa de amostragem de aproximadamente 1000 dados por ciclo um para sinal com a presença de agarramento e outro para sinal sem a presença de agarramento. O sinal OP foi gerado a partir da função de referência do controlador (Equação 4.2) e do sinal do erro do controlador (PV - SP) e ruído com variância igual a [0, 0,001, 0,002, ..., 0,02] foi adicionado.

Com os sinais gerados, a análise do pré-processamento foi conduzida de duas formas: utilizando apenas a redução da amostragem e utilizando a redução da amostragem e do excesso de ruído. Dessa forma, a taxa de amostragem foi variada de 5 a 1000 dados por ciclo e o excesso de ruído eliminado de acordo com a seção 4.1.1. A Figura 4.15 mostra os resultados na forma de gráfico de contorno.

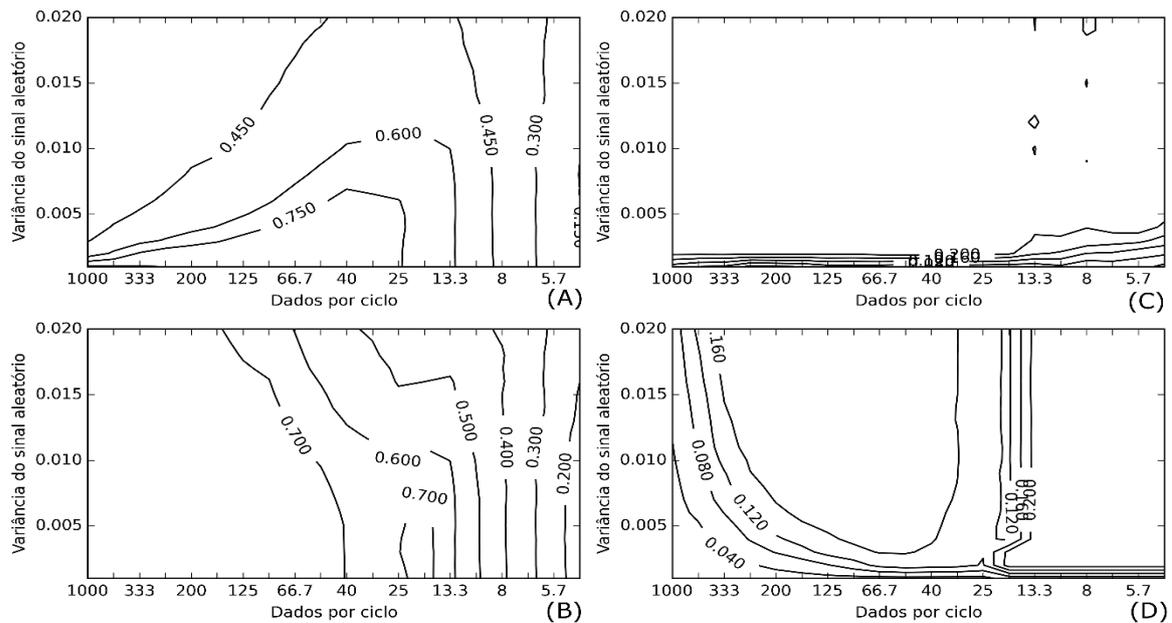


Figura 4.15: Índice de detecção para o método de Yamashita em função da amostragem (em dados por ciclo) e da variância do sinal aleatório para os casos: (A) com presença de agarramento e sem remoção do ruído; (B) com agarramento e com remoção do ruído; (C) sem agarramento e sem remoção do ruído; e (D) sem agarramento e com remoção do ruído.

Sabendo que para o método de Yamashita, o índice deve ser maior que 0,25 para indicar agarramento e menor que este valor para indicar outra causa de oscilação, pela Figura 4.15 é possível observar que:

- Para sinais com amostragem elevada e sem a utilização de pré-processamento, o diferencial é puramente causado pelo ruído e o método não detecta o agarramento, como já observado por outros autores;
- Para o caso com agarramento e taxa de amostragem de aproximadamente 25 dados por ciclo, o índice de agarramento se mantém elevado mesmo sem a utilização de filtros. Para o caso sem agarramento, o valor do índice foi adequado para toda a faixa analisada.
- A remoção do excesso de ruído elimina o problema para sinais com amostragem elevada.
- A utilização do filtro resultou em pequena diminuição no índice de agarramento para a amostragem de 25 dados por ciclo, indicando a suavização do sinal, mesmo assim, o índice indica forte evidência de agarramento.

Assim, tanto a redução da amostragem para valores próximos a 25 dados por ciclo como a eliminação do excesso do ruído foram eficientes como técnicas de pré-processamento para o método de Yamashita.

4.3 Estudo de caso para dados de plantas reais

Jelali e Scali (2010) testaram vários métodos de detecção do agarramento a 93 malhas de controle provenientes de plantas reais. Dependendo do método e da característica dos sinais, o pré-processamento foi utilizado ou não. Alguns dos tipos de pré-processamento foram: filtro passa-baixa para a remoção de ruído, filtro passa-alta para a remoção de tendências, filtro Savitzky–Golay para suavização do sinal e remoção da tendência por ajuste linear. Nesta seção, a metodologia proposta para o pré-processamento de dados será testada a algumas malhas selecionadas e comparadas aos resultados obtidos por Jelali e Scali (2010), considerados como *benchmark*. O resultado para todas as 93 malhas é apresentada na tabela no Apêndice 2 deste trabalho.

Como demonstrado anteriormente, a técnica utilizada para a identificação dos picos restringe a metodologia apenas a sinais com oscilações regulares, ou seja, que apresentem apenas uma frequência de oscilação ou que essa se sobreponha às demais. Considerando as análises fornecidas pelo *benchmark* existem: 18 malhas que não apresentam oscilação e outras 3 apresentam problemas nos dados da OP; para a análise do pré-processamento, outras 2 malhas foram identificadas como não oscilatórias e outras 15 como oscilação não regular (pela presença múltiplas frequências de oscilação ou pela variação da frequência de oscilação com o tempo em pelo menos um dos sinais da malha). Assim, um total de 55 malhas serão analisadas e comparadas.

A Figura 4.16 apresenta 3 exemplos do uso da metodologia para a remoção da média variável e do excesso do ruído. Como observado, o diagrama PV (OP) resultante não apresenta o deslocamento do centro que é característico para os casos com referência variável (antes do pré-processamento).

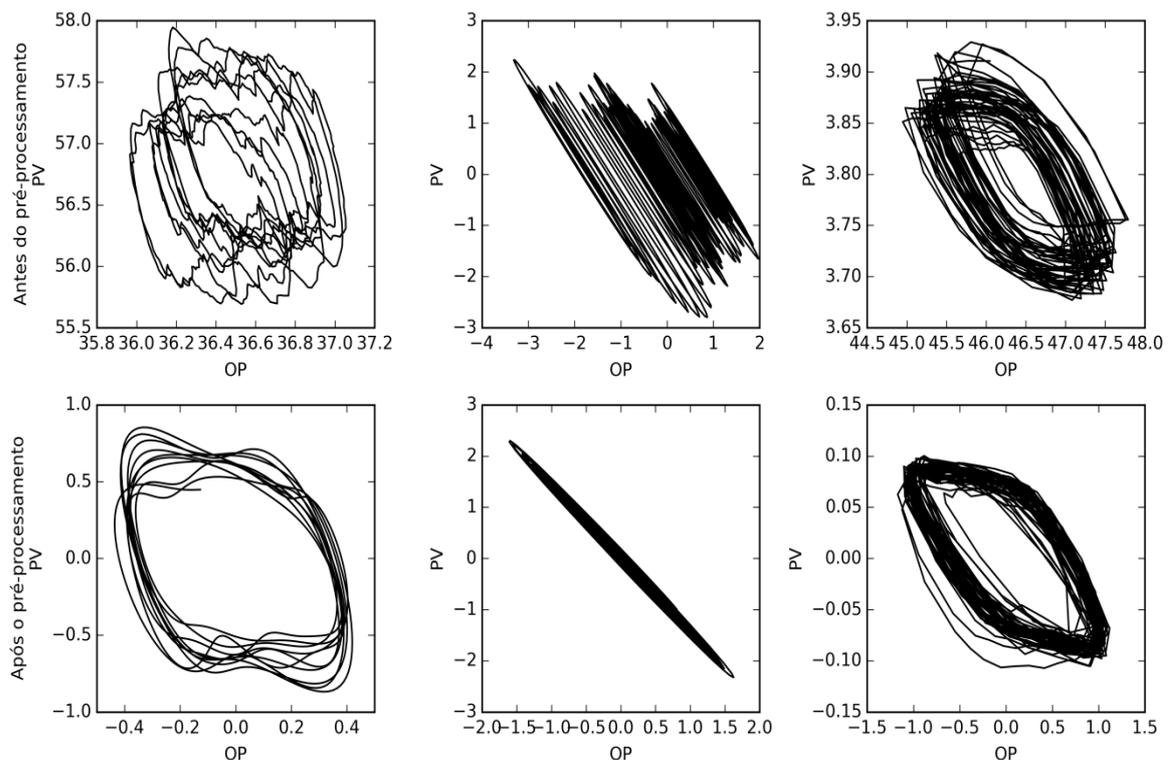


Figura 4.16: Aplicação da metodologia proposta para o pré-processamento de dados para a detecção do agarramento às malhas CHEM1, CHEM15 e CHEM25 (Dados emprestados de Jelali e Scali (2010))

4.3.1 Avaliação do método de detecção por correlação cruzada

Como já discutido na seção anterior, a utilização do pré-processamento para a identificação do agarramento pelo método da correlação cruzada é necessária para os casos de forte presença de referência variável. O *benchmark* utiliza filtros do tipo passa-alta para eliminar a influência da média variável onde a frequência de corte é baseada na frequência de oscilação, mas a metodologia para este cálculo não é apresentada. Para a comparação, a metodologia proposta para a remoção da referência variável foi utilizada para todas as malhas.

Das 93 malhas fornecidas, 16 malhas foram descartadas pelo *benchmark* por não serem oscilatórias ou por apresentarem problemas nos dados ou amostragem, outras 15 malhas foram descartadas por serem originadas de processos do tipo integrador, algumas malhas com características não oscilatórias foram analisadas. Para o teste da metodologia, outras 20 malhas foram descartadas, desta forma 42 malhas foram analisadas e comparadas destas, 32 apresentaram mesmos resultados e 10 apresentaram resultados diferentes.

A Figura 4.17 mostra a correlação cruzada para um sinal (CHEM49) com média variável evidente. Os sinais da correlação entre os dados OP e PV mostra que houve pouca variação entre os casos com e sem o pré-processamento onde os índices $\Delta\delta$ e $\Delta\tau$ encontrados são, respectivamente, 0,609 e 0,778 para análise sem pré-processamento e 0,613 e 0,778 para análise com pré-processamento, ambas indicando a presença de agarramento. Já para o *benchmark*, o resultado encontrado foi a causa incerta da oscilação. Como os parâmetros para o pré-processamento pelo *benchmark* não foram apresentados, uma análise mais aprofundada não pode ser feita, uma das razões para esta diferença pode estar na suavização excessiva dos sinais.

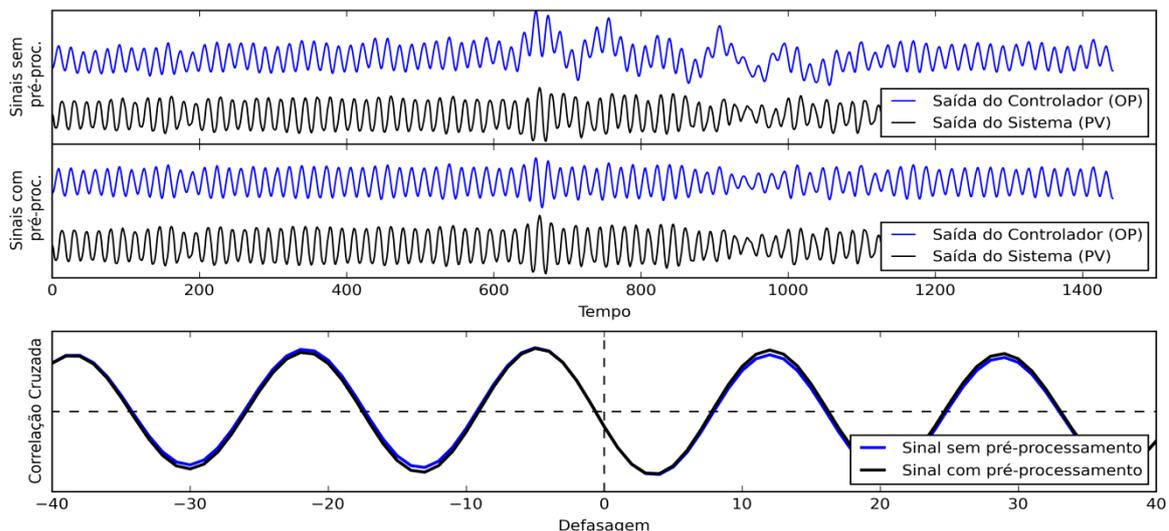


Figura 4.17: Correlação cruzada para sinal sem e com pré-processamento para malha CHEM49.

4.3.2 Avaliação do método de detecção por ajuste de curva

Para o método por ajuste de curva, o pré-processamento adotado foi a remoção da tendência e a obtenção dos zeros do sinal e a remoção do excesso de ruído. O *benchmark* utiliza várias estratégias para o pré-processamento para este método, entre elas: remoção da tendência (não detalhado qual o tipo), utilização apenas de parte do sinal e filtro do tipo Savitzky-Golay. A estratégia parece ser escolhida manualmente para cada sinal. Das 93 malhas analisadas, o *benchmark* desconsidera 21, para a análise do pré-processamento, outras 14 malhas foram descartadas por não serem adequadas a metodologia. Das 53 malhas restantes, 37 apresentaram o mesmo resultado e 21 resultados diferentes.

A partir da Figura 4.18, verifica-se que duas malhas apresentaram resultados diferentes (CHEM 13 e CHEM 49) antes e após o pré-processamento. Como observado, as duas malhas apresentam problemas com média variável, para o *benchmark*, a primeira é corrigida através da remoção da tendência, a segunda é analisada sem o uso do pré-processamento, o resultado foi o índice de agarramento respectivamente iguais a 0,12 e 0,14. Para a metodologia proposta, a tendência foi removida com eficiência, mas o resultado para os dois casos foi de agarramento incerto. A Figura 4.18 apresenta as malhas antes e após o pré-processamento.

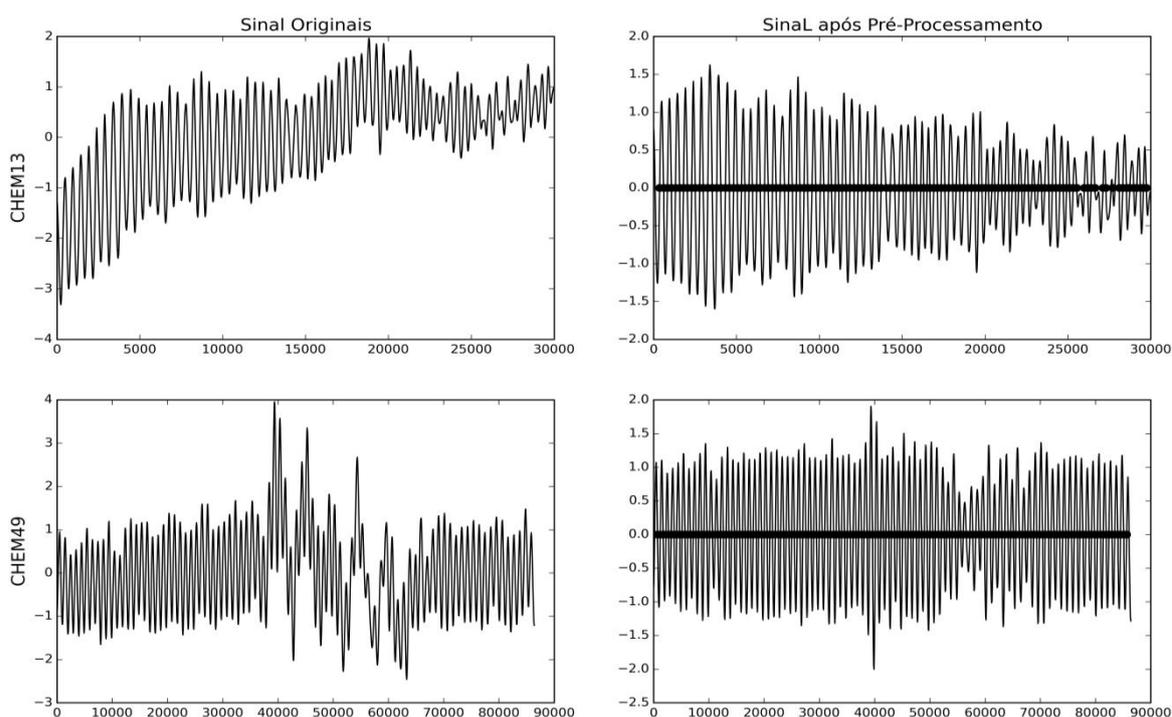


Figura 4.18: Malha CHEM13 e CHEM 49 antes e após o pré-processamento. Dados fornecidos por Jelali e Scali (2010).

4.3.3 Avaliação do método de detecção pelo método das áreas

O pré-processamento adotado para este método foi exatamente igual ao método de ajuste de curvas. Já para o *benchmark*, foi utilizado filtro do tipo média móvel com 5 pontos. Esse método foi aplicado a um número restrito de malhas pelo *benchmark*, totalizando 52 malhas, para a metodologia, 61 malhas foram consideradas. Das 43 malhas analisadas por ambos, 30 apresentaram o mesmo resultado e 13 apresentaram resultados diferentes.

A Figura 4.19 apresenta um caso com resultados diferentes, onde o resultado obtido pelo *benchmark* foi a não presença do agarramento, enquanto que para a metodologia, o

agarramento foi detectado. Na Figura 4.19(C), um fragmento é isolado para melhor análise, como observado, os picos e vales estão deslocados para a direita, o que torna a área anterior maior que a área posterior, o que indica o agarramento. Apesar da referência variável no sinal, o agarramento foi confirmado mesmo para os dados antes do uso do pré-processamento, o que indica que houve perda das informações características do agarramento após o pré-processamento pelo *benchmark*. Como o sinal apresenta poucos dados por ciclo (aproximadamente 17) e os picos e vales estão localizados próximos à região onde acontece o salto no sinal, a utilização do filtro do tipo média móvel tende a deslocar o valor dos máximos e mínimos para o centro, diminuindo o valor do índice de agarramento, como observado na Figura 4.19 (D).

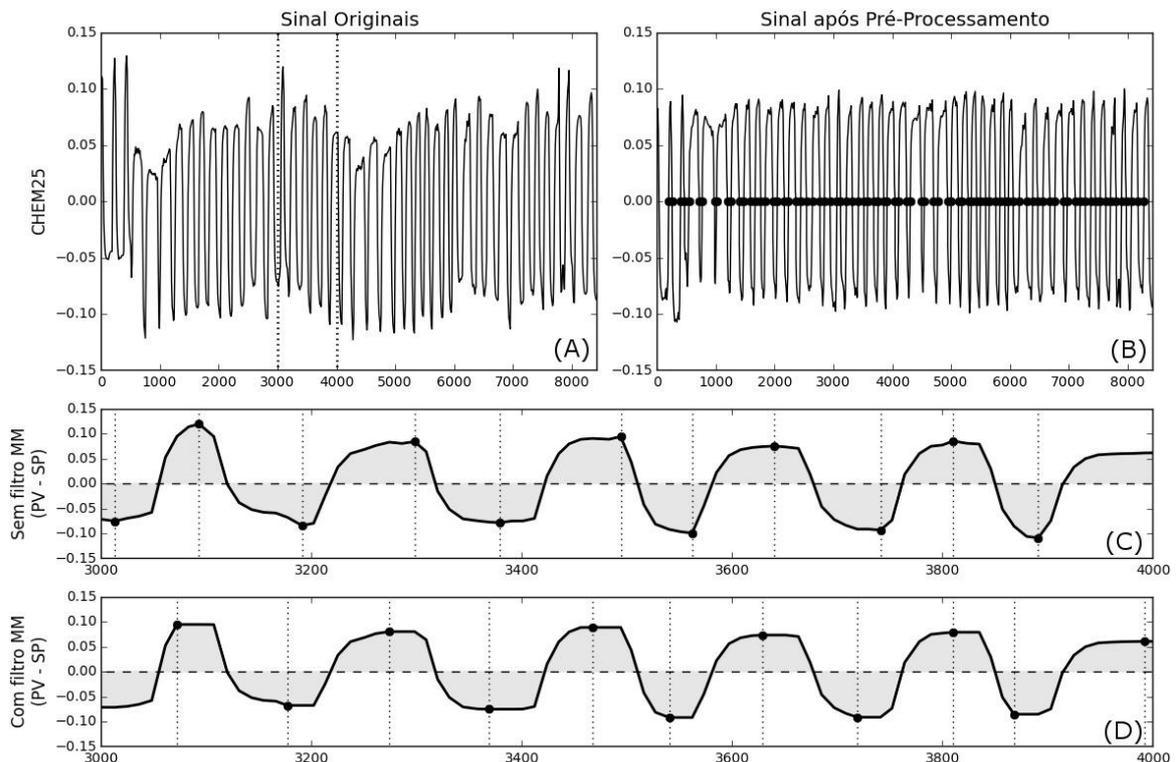


Figura 4.19: Pré-processamento para método das áreas.

4.3.4 Avaliação do método de detecção para o método de Yamashita

A técnica de pré-processamento para o método de Yamashita é a redução do excesso do ruído por uso de filtro e a diminuição da amostragem para valores próximos de 25 dados por ciclo. O *benchmark* utiliza apenas a redução do ruído pelo uso de filtro, mas não especifica os critérios utilizados. Como dados MV não são disponibilizados, a análise será feita apenas para malhas onde a vazão é a variável controlada (dinâmica rápida), assim, 52 malhas foram analisadas pelo *benchmark*, que considerou sinais sem a presença de oscilação. Para a metodologia proposta, 27 malhas foram analisadas. Para a comparação, 19 malhas apresentam resultados iguais e 8 apresentam resultados diferentes.

Na Figura 4.20, a malha CHEM23 que obteve resultados diferentes, onde, por inspeção visual, a presença de agarramento é clara. Para o *benchmark*, o índice de agarramento foi igual a 0,167, não indicando a presença do agarramento, enquanto que o índice após a

aplicação do pré-processamento foi igual a 0,45, indicando forte presença de agarramento. Como não foi especificada detalhadamente a metodologia para o pré-processamento, não é possível fazer uma análise mais detalhada, mas a provável causa de erro para o *benchmark* foi o uso de frequência de corte elevada, o que não foi suficiente para a remoção do excesso de ruído.

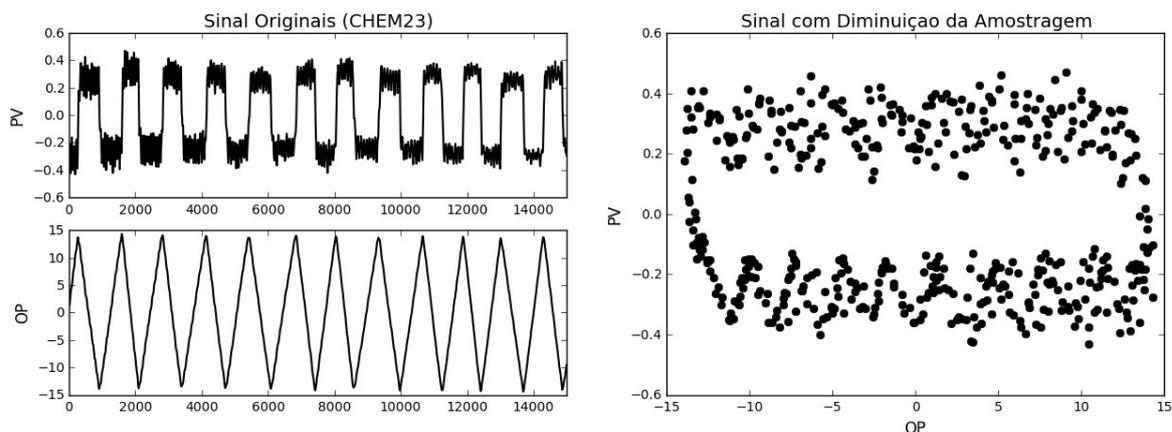


Figura 4.20: Aplicação da diminuição da amostragem para a malha CHEM23 para posterior aplicação ao método de Yamashita.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo, técnicas de pré-processamento de sinais para a detecção do agarramento foram propostas e testadas para os métodos já existentes. As técnicas objetivam a automatização do pré-processamento e, por sua vez, aplicação dos métodos de detecção propostos na literatura. A metodologia foi criada com o cuidado de preservar a essência do sinal necessário para permitir a correta avaliação do agarramento.

A metodologia proposta é composta de técnica para a remoção do excesso de ruído, detecção dos picos e vales, remoção da referência variável e detecção dos zeros. O excesso de ruído é removido pela utilização de filtro passa-baixa com frequência de corte igual a cinco vezes a frequência fundamental (frequência de oscilação), picos e vales são identificação através da divisão do sinal em janelas limitadas por pontos de inflexão do sinal suavizado, a referência variável é a média do ajuste dos picos e vales através de *splines* de terceira ordem, finalmente, os zeros são identificados sendo o valor da mediana de todos os zeros encontrados entre um pico e vale, ou vice-versa.

A escolha da técnica de pré-processamento depende do método de detecção do agarramento. Para o método das correlações cruzadas, a técnica para a remoção da referência variável é utilizada quando existe a presença de forte distúrbio. O pré-processamento para os métodos de ajuste de curvas e das áreas é a remoção do excesso de ruído, remoção da referência variável e identificação dos picos. Para o método de Yamashita, tanto a remoção da amostragem para valores próximos a 25 dados por ciclo quando as remoções do excesso do ruído podem ser utilizadas como método de pré-processamento.

A metodologia de pré-processamento proposta foi comparada com dados provenientes do trabalho de Jelali e Scali (2010). Alguns sinais foram descartados por não possuírem oscilação ou por não serem aplicáveis aos métodos de detecção ou metodologia proposta. Os resultados para a metodologia e para o *benchmark* apresentaram resultados

semelhantes para um grande número de análises, o que indica resultado satisfatório considerando que o *benchmark* utiliza escolha individual do pré-processamento de acordo com a necessidade. Algumas malhas que obtiveram resultados diferentes pela comparação demonstram claramente problemas devido ao uso inadequado do pré-processamento pelo *benchmark*.

Apesar dos resultados, a técnica proposta é limitada devido ao fato de ser necessária a identificação da frequência de oscilação do sinal, a qual é restrita para sinais com oscilação regular.

Novos estudos devem ser conduzidos para o aperfeiçoamento das técnicas de pré-processamento para a detecção do agarramento. Métodos mais eficientes para a identificação dos picos e vales podem ser considerados de modo a eliminar a necessidade por sinais de oscilação regular. Assim como, outros métodos de detecção do agarramento devem ser avaliados.

Capítulo 5 – Aplicação Industrial

O teste final das duas abordagens propostas (i.e., novos métodos de detecção ou uso do pré-processamento) consiste na sua aplicação no cenário industrial de uma refinaria. Para tanto, selecionou-se malhas com presença evidente de oscilação.

Os dados a serem analisados neste capítulo são provenientes de uma unidade de hidrotratamento (HDT). A unidade processa misturas de querosene de destilação direta, diesel de destilação direta, óleo leve de reciclo e gasolina de coque, tem capacidade de processar 6000 m³/d e também pode processar misturas contendo 5% de óleo vegetal. A unidade apresenta dois reatores de hidrotratamento, responsáveis pela absorção de metais, absorção de sílica e reação pela hidrodessulfurização (HDS) e um terceiro reator que converte os poliaromáticos em monoaromáticos e promove a hidrodessnitrogenação.

5.1 Descrição dos dados e discussão preliminar

Para a análise, foram disponibilizadas 107 malhas, das quais foram selecionadas 14 com presença evidente de oscilação por inspeção visual para a análise da causa. Em um primeiro momento, o conjunto de dados foi fornecido por uma empresa de *software*, ou seja, não foram coletados diretamente na planta. Os dados foram amostrados durante um período de 2 ou mais dias e apresentam certa compressão. Cada variável, ainda que dentro de uma mesma malha, pode apresentar diferente número de pontos armazenados e taxa de amostragem.

Devido a essa configuração, algumas malhas apresentam número de pontos insuficientes para a análise ou mesmo para a visualização dos dados. Dessa forma, antes de verificar a causa da oscilação em cada uma das malhas selecionadas, o fator de compressão será calculado baseado no trabalho de Choudhury *et al.* (2008a) resumido no apêndice 5 deste trabalho. Para o cálculo do fator de compressão, os dados foram reconstruídos a partir da interpolação linear entre os pontos amostrados, considerando o tempo de amostragem (T_s) constante. Como o valor de T_s não é especificado, será utilizado para cada variável o menor valor da diferença do tempo entre dois pontos.

Como forma de ilustrar o procedimento de reconstrução dos sinais e o cálculo do fator de compressão, a Figura 5.1 mostra um fragmento dos dados de uma malha proveniente

desse conjunto de dados onde a vazão é a variável controlada. O fragmento representa o intervalo de 1325 segundos onde 100 dados foram armazenados com tempo de amostragem igual a 5, 10, 15, 20 ou 25. Por consequência, para a reconstrução dos dados o valor de T_s arbitrado é igual a 5 e, a partir disso, os dados entre os pontos armazenados foram calculados por interpolação linear. O fragmento reconstruído apresenta 266 dados e o fator de compressão encontrado é igual a 2,66. O valor menor que 3 indica que o sinal reconstruído represente satisfatoriamente o sinal original (antes da compressão) e pode ser utilizada em análises.

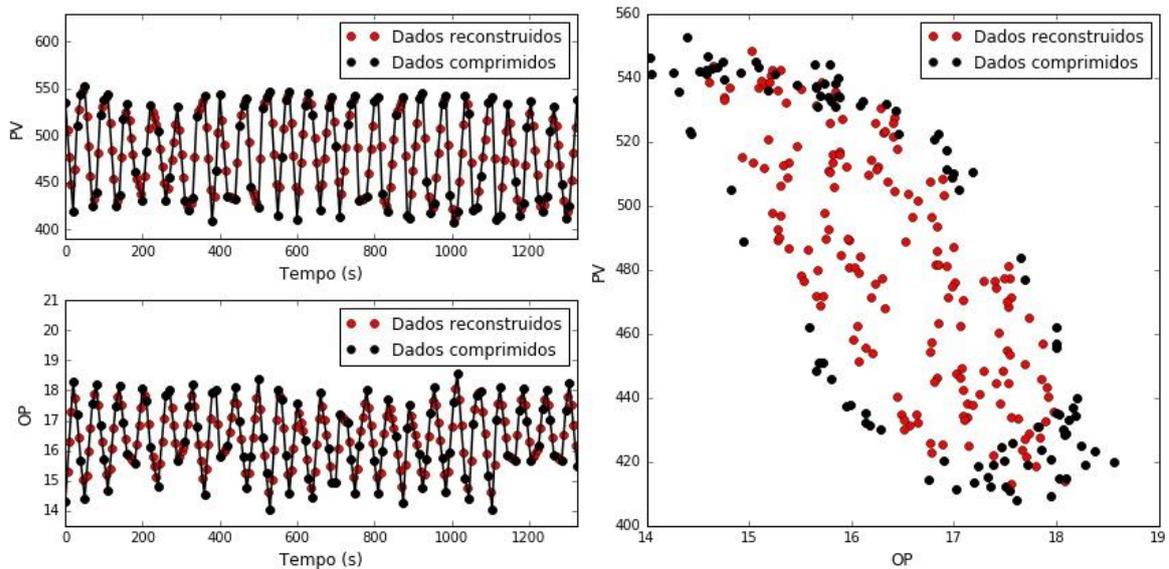


Figura 5.1: Exemplo de malha proveniente dos dados fornecidos pela empresa de *software*.

A informação que o sinal reconstruído representa o sinal original pode não ser suficiente para garantir que o sinal é adequado para a análise do agarramento. Sabe-se que para processos do tipo autorregulatórios (como o apresentado na Figura 5.1) e com presença de agarramento o sinal de saída do controlador (OP) possui forma triangular e o sinal de saída do processo (PV) forma quadrada. Para presença de outras causas de oscilação, ambos os sinais têm a forma senoidal. Pela Figura 5.1, ambos os sinais parecem apresentar forma triangular, os seja, não caracterizam o agarramento nem mesmo outra causa de oscilação, além disso, pelo gráfico de fase (direita) é observado que a adição dos pontos interpolados (vermelho) afasta a forma do gráfico do perfil elipsoidal, o que poderia indicar a presença de agarramento.

Preliminarmente, dois fatores podem ter ocasionado o problema: a frequência de amostragem ou a compressão dos dados.

5.1.1 Efeito da frequência de amostragem

A Figura 5.2 mostra os três sinais normalmente estudados na análise do agarramento amostrados em diferentes frequências, onde F_o é a frequência de oscilação e F_s é a frequência de amostragem. Como observado, para baixos valores de F_s (menores que 4 vezes a frequência de oscilação, neste caso) a distinção do sinal de forma triangular, quadrada ou senoidal não pode ser feita. Para a frequência de amostragem igual a 8 vezes

a frequência de oscilação, muitos pontos para a forma triangular e senoidal estão sobrepostos ou próximos, mas a distinção poderia ser feita mesmo visualmente considerando que para o sinal senoidal existe uma concentração maior de pontos próximo dos picos e vales (segundo o método de segmentação em zonas).

Voltando para o exemplo apresentado na Figura 5.1, considerando que o sinal reconstruído representa o sinal original, são observados 22 ciclos, como o sinal possui 266 dados então a frequência de amostragem é aproximadamente igual a 13 vezes a frequência de oscilação do sinal. Por inspeção visual do gráfico OP em função do tempo, é observado que a maioria dos picos e vales não estão aglomerados, o que pode indicar a presença de agarramento.

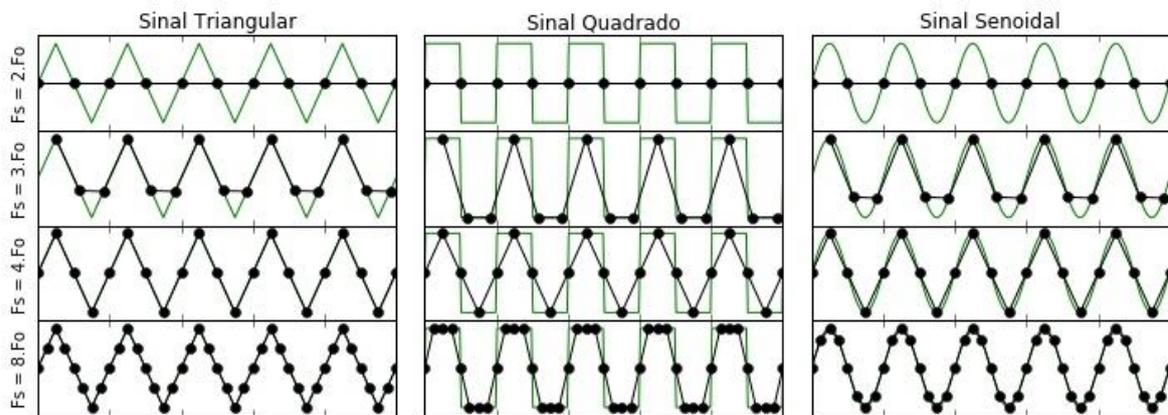


Figura 5.2: Efeito do tempo de amostragem sob sinais do tipo triangular, senoidal e quadrado

5.1.2 Efeito da compressão dos dados

Entre os algoritmos de compressão de dados, os utilizados industrialmente são, na maioria dos casos, os métodos diretos, principalmente porque são aplicados em tempo real (Silveira, 2012). Esses métodos são também chamados de “lineares por partes” (do inglês, *piecewise linear*) já que o sinal armazenado é uma linha reta enquanto os dados amostrados estão dentro de uma dada tolerância. Alguns dos algoritmos pertencentes a essa classe são: *Boxcar*, *Backslope*, *Boxcar/Backslope* (Hale e Sellars, 1981) e *Swinging door* (Bristol, 1987). A descrição simplificada de cada algoritmo pode ser encontrados no apêndice 4 deste trabalho ou mais detalhadamente no trabalho de Silveira (2012). A Figura 5.3 demonstra a aplicação da compressão de dados em sinal triangular, quadrado e senoidal para os quatro algoritmos citados. A tolerância foi ajustada de modo que o número de dados por ciclo fosse aproximadamente igual a 6 para o sinal senoidal.

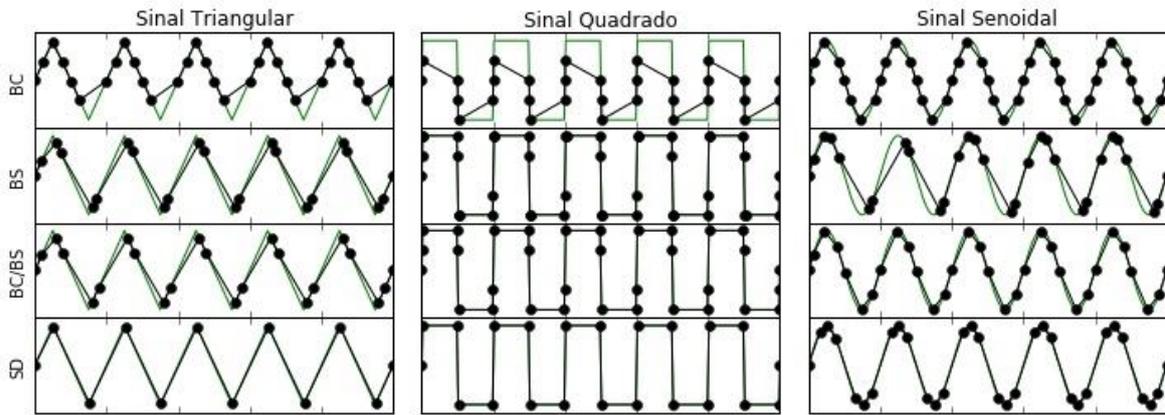


Figura 5.3: Efeito da compressão dos dados em sinais típicos para a análise do agarramento pelos algoritmos *Boxcar*, *Backslope*, *Boxcar/Backslope* e *Swinging Door* para tolerância ajustada para sinal senoidal com 6 dados.

A Figura 5.3 ilustra como a compressão varia em relação à forma do sinal para os diferentes métodos. Para o método *Boxcar* aproximadamente o mesmo número de pontos são armazenados para as diferentes formas; para o método *Backslope* e *Boxcar/Backslope* o número de pontos para o sinal triangular é diminuído e concentrado nos extremos, nestes dois casos é observado que os sinais triangulares e senoidais se tornam praticamente idênticos em alguns fragmentos; para o método *Swinging Door* o número de pontos salvos para o sinal triangular e quadrado é menor, mas ainda assim são facilmente diferenciados. A Figura 5.4 mostra a mesma análise para tolerância ajustada de modo que o sinal senoidal possua 4 dados por ciclo.

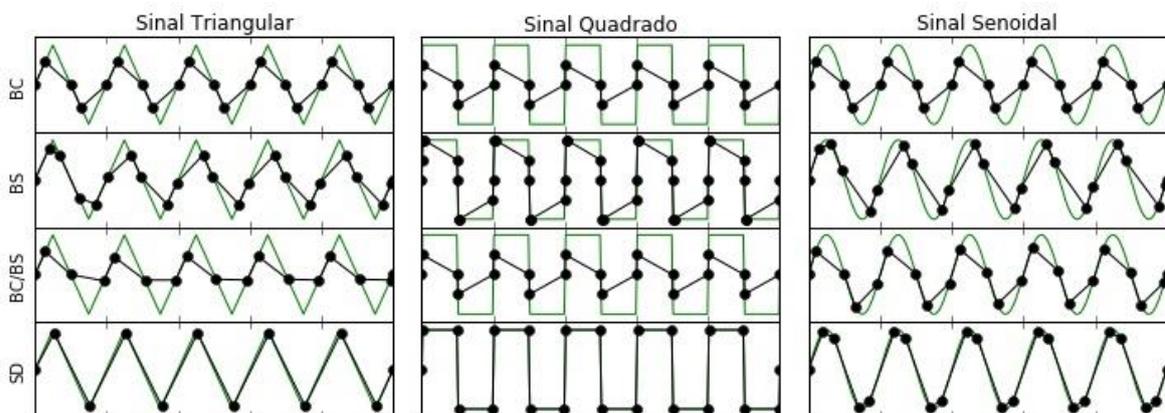


Figura 5.4: Efeito da compressão dos dados em sinais típicos para a análise do agarramento pelos algoritmos *Boxcar*, *Backslope*, *Boxcar/Backslope* e *Swinging Door* para tolerância ajustada para sinal senoidal com 4 dados.

Como observado, os algoritmos de compressão deformaram o sinal original de tal forma que não é possível diferenciá-los. Assim, será apenas considerado para a análise do agarramento sinais comprimidos que apresentem pelo menos 6 dados por ciclo.

Os resultados podem ser completamente diferentes para sinais com a presença de ruído e distúrbio entre outros fatores, cuja análise mais detalhada foge do escopo deste trabalho.

5.2 Avaliação da qualidade do sinal

Anterior à análise do agarramento, a qualidade do sinal é avaliada conforme a discussão anterior. Sinais serão considerados aptos a serem analisados quando obedecerem a todas as restrições abaixo:

- O índice de compressão deve ser menor que 3 para que o sinal comprimido represente o sinal original;
- O sinal comprimido deve possuir ao menos 6 dados por ciclo para que seja possível a classificação da forma do sinal;
- O sinal reconstruído, ou original caso não haja compressão, deve possuir ao menos 8 dados por ciclo para que seja possível classificar a forma do sinal.

5.2.1 Análise para sinais comprimidos

A verificação da qualidade dos dados comprimidos é apresentada na Tabela 5.1. Como observado: a compressão dos dados foi excessiva para 9 das 14 malhas escolhidas; 3 malhas apresentam menos que 6 dados armazenados por ciclo para vários fragmentos analisados; todas as malhas apresentam mais de 8 dados por ciclo para o sinal reconstruído. Por fim, das 14 selecionadas, apenas 5 são classificadas como adequadas para a detecção do agarramento para pelo menos algum intervalo de tempo, as demais, apresentam oscilação evidente, mas a causa não pode ser definitivamente diagnosticada.

Outro fator observado na Tabela 5.1 é que a compressão dos dados parece ter sido realizada da mesma forma para diferentes malhas, independente da tolerância ou qualquer outra restrição (mesmo número de pontos armazenados e fator de compressão). Consequentemente, para evitar a detecção incorreta do agarramento, esse conjunto de dados será desconsiderado.

Tabela 5.1: Verificação da qualidade dos sinais comprimidos e reconstruídos. Os pontos por ciclo foram obtidos por inspeção visual em diferentes fragmentos, o valor apresentado foi o maior encontrado.

Malha	T _s	Num. Pontos Armaz.	Num. Pontos Reconst.	Fator de Compressão	Pont./Ciclo Armaz.	Pont./Ciclo Reconst.
F1	5	9215 44	29349	3,185	5	16
F2	5	063	91798	2,083	6	12
F3	5	9215	29349	3,185	5	16
F4	5	9215	29349	3,185	5	16
F5	5	9215	29349	3,185	6	17
F6	5	44063	91798	2,083	7	15
F7	5	44063	91798	2,083	11	21
L1	5	43492	136592	3,141	6	20
L2	5	9215	29349	3,185	11	22
L3	5	9215	29349	3,185	6	19
L4	5	44063	91798	2,083	69	104
L5	5	44063	91798	2,083	47	91
T1	5	22741	137227	6,034	11	72
T2	5	20020	137227	6,854	72	432

5.2.2 Análise para sinais não comprimidos

Para a continuação da análise, novos dados foram solicitados para as mesmas malhas selecionadas anteriormente. O novo conjunto de dados foi extraído diretamente da planta sem compressão para o período de dois dias que não corresponde ao mesmo período dos dados analisados anteriormente (extraídos aproximadamente 6 meses depois do primeiro conjunto de dados). Todos as malhas apresentam tempo de amostragem igual a 10 segundos totalizando 17280 pontos.

A Figura 5.5 apresenta fragmentos retirados das malhas onde a variável controlada é a vazão, todos os fragmentos possuem 100 amostras e foram escolhidos individualmente. Note que a escala é diferente para cada sinal tanto no tempo quanto na amplitude, dessa forma foi possível escolher fragmento onde a oscilação é melhor visualizada e também analisar a amplitude de oscilação de cada sinal. Por inspeção visual, é observado que as malhas F6 e F7 não possuem oscilação, como observado a amplitude de ambos os sinais na Figura 5.5 é pequena, o que indica que a variação deve ter sido causada apenas pelo ruído. Já para as demais malhas, a oscilação é evidente.

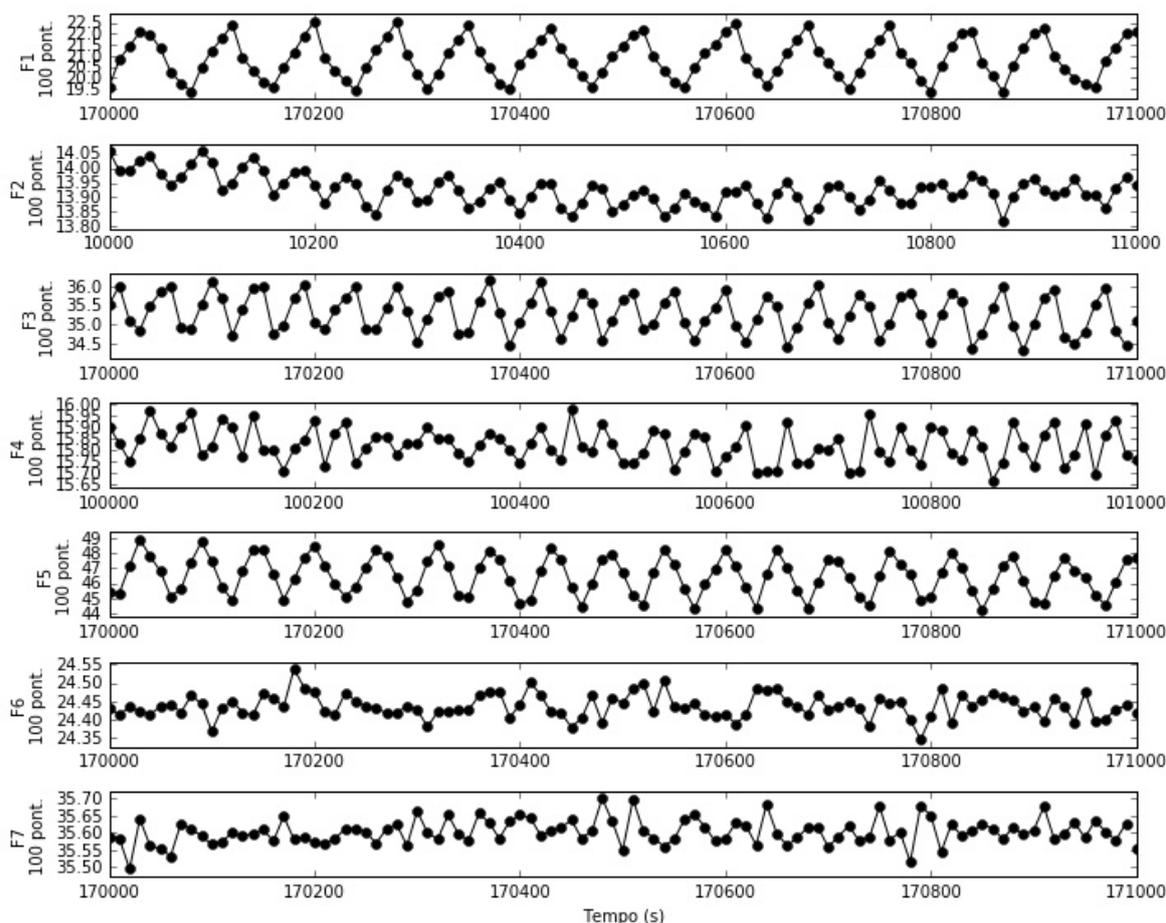


Figura 5.5: Fragmento dos sinais para malhas onde a vazão é a variável controlada

A Figura 5.6 mostra um fragmento para as demais malhas, para esse caso, o número de pontos foi variado de modo que a oscilação pudesse ser observada. Como visto, as malhas L1, T1 e T2 não apresentam oscilação, em L1 a amplitude pouco varia em relação ao tempo,

em T1 e T2 existe variação, mas essa não caracteriza oscilação regular; as malhas L2 e L3 parecem apresentar oscilação, mas essa, por possuir baixa amplitude, é mascarada pelo ruído; as malhas L4 e L5 apresenta oscilação.

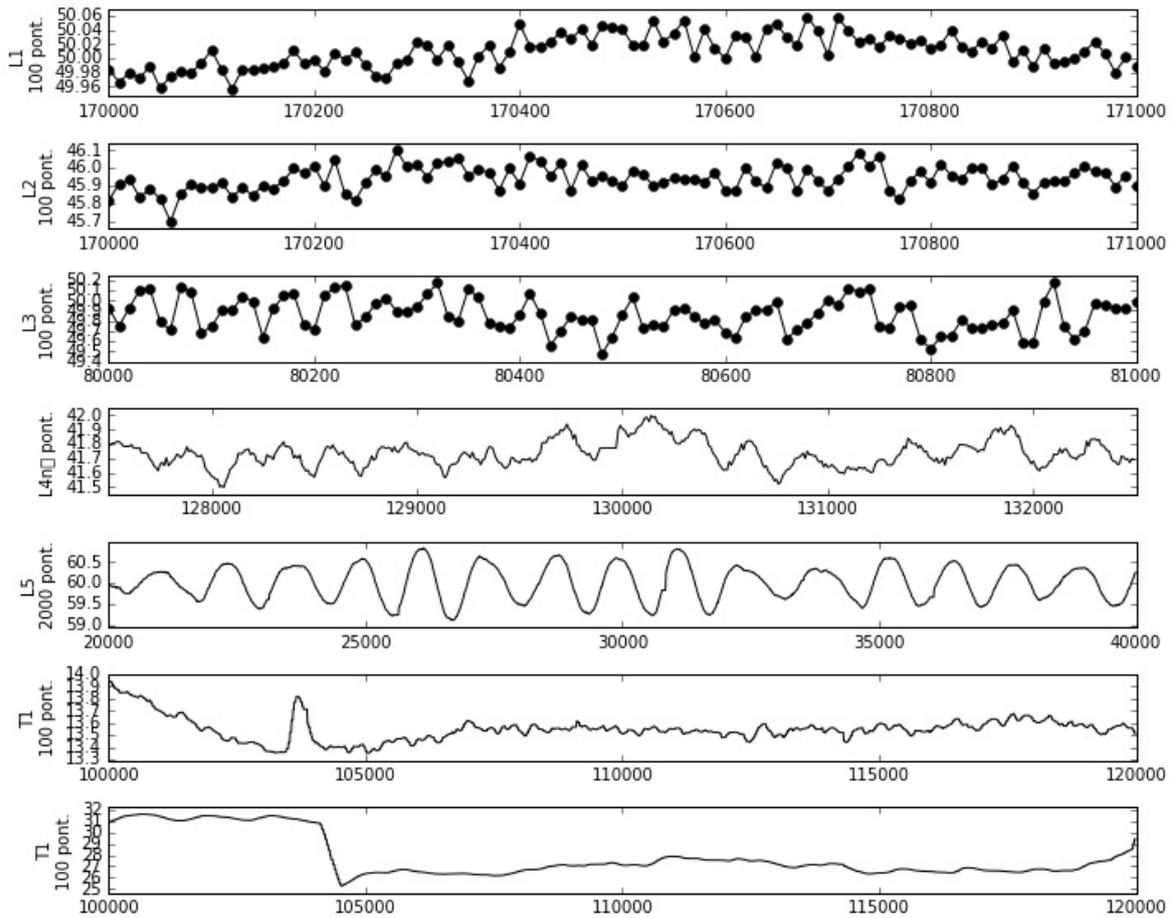


Figura 5.6: Fragmento dos sinais para malhas onde o nível e a temperatura são as variáveis controladas

A avaliação da qualidade dos dados para o novo conjunto, como feita para o primeiro conjunto, é apresentado na Tabela 5.2. Como observado, apenas as malhas F1, L4 e L5 obedecem às restrições para a análise do agarramento

Tabela 5.2: Verificação da qualidade dos sinais para o novo conjunto de dados.

Loop	Ts	P. Arm.	PC Arm.
F1	10	17280	9
F2	10	17280	6
F3	10	17280	5
F4	10	17280	4
F5	10	17280	6
F6	10	17280	Não oscila
F7	10	17280	Não oscila
L1	10	17280	Não oscila
L2	10	17280	4
L3	10	17280	5
L4	10	17280	30
L5	10	17280	130
T1	10	17280	Não oscila
T2	10	17280	Não oscila

A Tabela 5.2 apresenta um grande problema referente à análise da causa da oscilação em uma malha. A maioria dos sinais oscilatórios nesse caso possuem período de oscilação menor que 60 segundos, com o tempo de amostragem (T_s) igual a 10 segundos, 6 ou menos dados serão salvos por ciclo o que impossibilita a análise. Além disso, o baixo período (alta frequência) de oscilação provoca um grande número de inversão no sentido de deslocamento da válvula, o que contribui para o desgaste excessivo da haste. Para período igual a 60 segundos, o sentido será invertido 2880 vezes em um único dia.

5.3 Avaliação das técnicas propostas para a detecção do agarramento

A Figura 5.7 mostra os fragmentos dos sinais que serão utilizados na análise das técnicas propostas, os fragmentos foram selecionados individualmente de modo que o sinal possuísse número suficiente de ciclos e oscilação regular. Para o primeiro sinal (malha F5) o processo é do tipo autorregulatório, a forma triangular no sinal OP indica a presença do agarramento. Para o segundo e terceiro sinais (malhas L4 e L5, respectivamente) o processo é do tipo integrador, a forma senoidal no sinal de L5 indica que o agarramento não é a causa da oscilação, já para o sinal de L4, não é possível chegar a alguma conclusão por inspeção visual. Figura 5.7 também mostra a presença da referência variável para o primeiro e segundo fragmento. Para a análise, mais de um fragmentos poderiam ter sido considerados de modo a aumentar a confiança dos resultados, mas, devido à dificuldade de se encontrar fragmentos com oscilação regular nos dados coletados e a falta de metodologia para a fragmentação automática, apenas os fragmentos mostrados na Figura 5.7 serão utilizados.

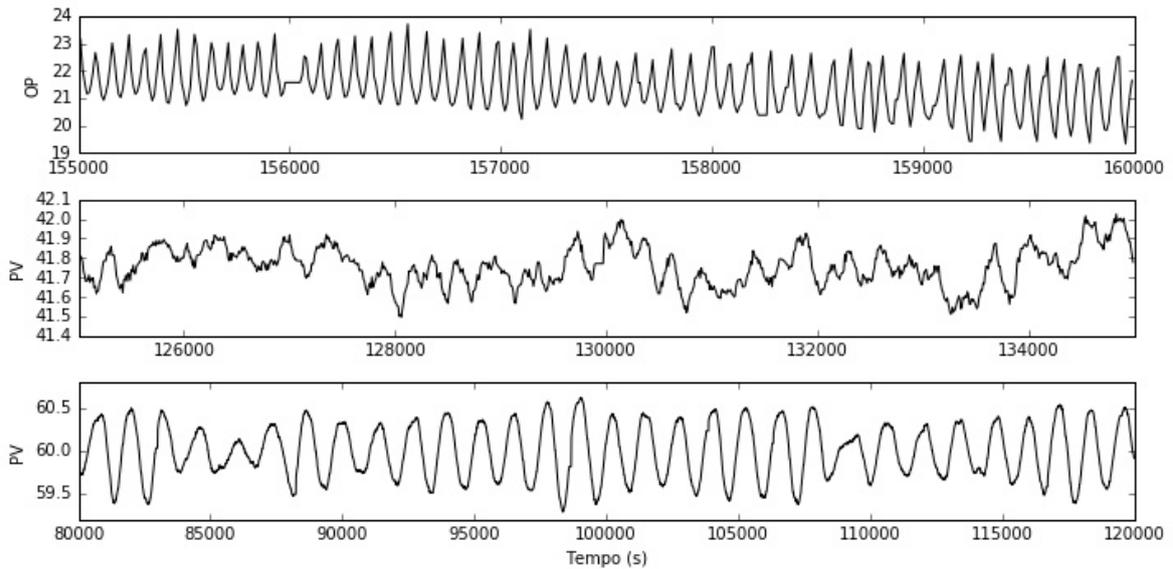


Figura 5.7: Fragmentos escolhidos para a análise do agarramento pela metodologia proposta para as malhas F4, L4 e L5.

A Figura 5.8 mostra o fluxograma utilizado para a análise da metodologia baseado nos Capítulos 3 e 4 deste trabalho. Na figura, o método de ajuste de curvas passa pelo pré-processamento descrito no Capítulo 4, enquanto que para a análise da metodologia sem o uso do pré-processamento (seção 5.3.1.), o algoritmo original proposto por He (2007) foi utilizado.

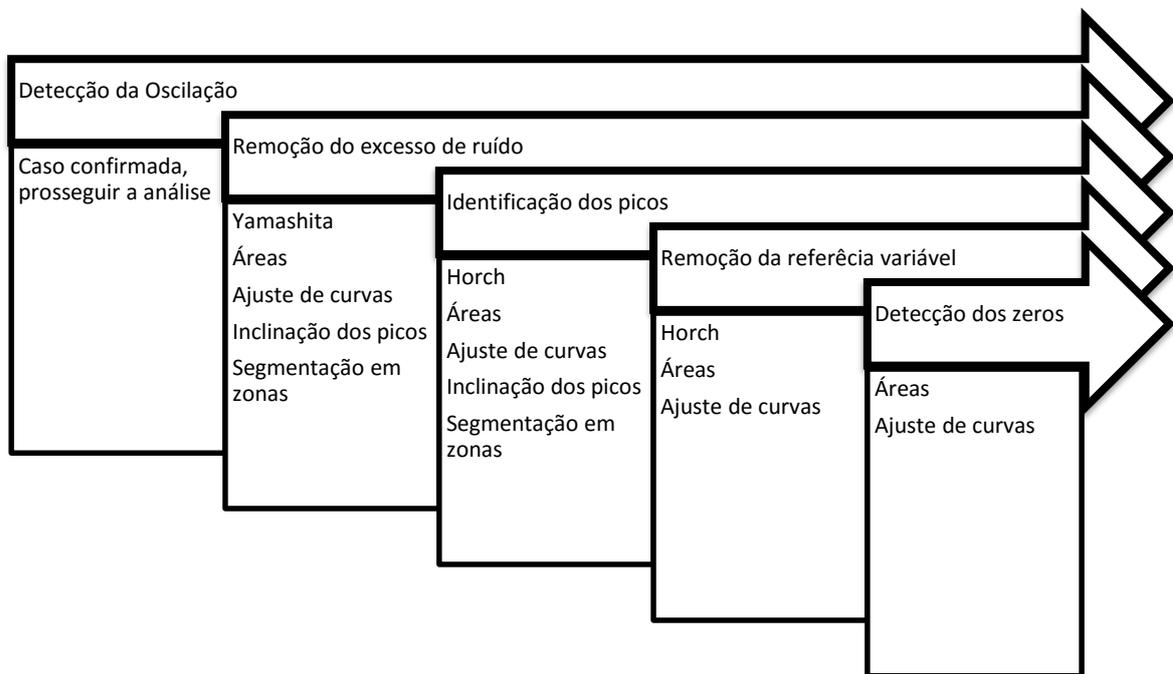


Figura 5.8: Fluxograma para identificação do agarramento seguindo a metodologia proposta nos Capítulos 3 e 4.

5.3.1 Avaliação para as técnicas de detecção do agarramento para sinais com referência variável.

Ambos os métodos propostos para a detecção do agarramento para sinais com referência variável apresentados no Capítulo 3 assim como o método de ajuste de curva sem o uso do pré-processamento foram utilizados para a detecção do agarramento dos fragmentos selecionados. A Tabela 5.3 apresenta os resultados.

Tabela 5.3: Identificação do agarramento para o método de ajuste de curva e métodos propostos. Onde “Inc” é a presença incerta do agarramento devido a problemas com a aplicação da técnica de detecção.

Sinal	Método					
	Ajuste de curva		Inclinação dos picos		Segmentação em zonas	
	SI	Agar.	SI	Agar.	SI	Agar.
F1	Média variável	Inc.	Poucos dados	Inc.	0,64	Sim
L4	Média variável	Inc.	1,12	Sim	0,81	Sim
L5	0,38	Não	0,29	Não	0,04	Não

As análises de ambos os sinais com referência variável resultaram em erro para o método de ajuste de curva já que parte do sinal foi posicionado completamente acima ou abaixo da linha central (trecho sem cruzamento com o zero). O método de inclinação dos picos mostrou-se ineficiente para sinais com poucos dados por ciclo (F1, nesse caso). Neste caso os picos foram encontrados eficientemente, mas muitos ciclos não possuem outro ponto dentro da região de avaliação para o cálculo da inclinação. O método de segmentação em zonas pode ser aplicado aos três sinais e o resultado foi consistente com o analisado por inspeção visual.

5.3.2 Avaliação para as técnicas de pré-processamento de dados

Nesta seção, a metodologia para o pré-processamento de dados foi testada para quatro métodos de detecção, como descrito no Capítulo 4, os resultados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Identificação do agarramento para os métodos de correlação cruzada, áreas, ajuste de curva e Yamashita após a aplicação da metodologia

Sinal	Método							
	Correlação		Áreas		Ajuste		Yamashita	
	SI	Agar.	SI	Agar.	SI	Agar.	SI	Agar.
F1	0.15	Inc.	1,46	Sim	0,76	Sim	0,32	Sim
L4	-	-	-	-	0,73	Sim	-	-
L5	-	-	-	-	0,04	Não	-	-

A malha F1 apresenta poucos dados por ciclo, dessa forma não foi possível aplicar a metodologia de remoção do excesso de ruído, para as demais malhas, a metodologia completa foi aplicada. Com exceção do resultado para o método das correlações cruzadas para a malha F1, todos os resultados estão compatíveis com a análise por inspeção visual. A aplicação da metodologia para a malha L5 melhorou o resultado para o método de ajuste

de curva: antes do pré-processamento o valor do índice de agarramento foi de 0,38, ou seja, próximo da região de incerteza; após o pré-processamento esse índice é igual a 0,04 indicando que o sinal foi ajustado praticamente perfeitamente à função senoidal.

Os métodos das correlações cruzadas, das áreas e Yamashita não são aplicáveis a processos do tipo integrador (L4 e L5).

5.4 Considerações finais

A análise da causa da oscilação a um conjunto de sinais industriais apresenta vários problemas, além da presença do ruído e da referência variável. A técnica de compressão de dados assim como a tolerância escolhida quando mal aplicados podem comprimir o sinal de tal forma que esse não represente o sinal original extraído diretamente da planta. A taxa de amostragem quando muito baixa impossibilita a análise para sinais com frequência de oscilação elevada. Dados industriais podem possuir centenas de milhares de pontos, assim a seleção de algum fragmento é uma atividade exaustiva quando aplicada a cada malha individualmente, o tamanho do fragmento deve ser escolhido em função da frequência de oscilação, mas a variação da frequência de oscilação, a presença de trechos sem oscilação ou mesmo a presença de oscilação em outra frequência dificultam a segmentação automática dos dados.

Nesse capítulo, a metodologia para a detecção da oscilação em sinais de referência variável e as técnicas de pré-processamento foram avaliadas a dados provenientes de uma unidade de hidrotreatamento de uma refinaria. Previamente 14 malhas com presença evidente de oscilação foram escolhidas e, a seguir, foi verificado o grau de compressão dos dados. Para se poder aplicar as diferentes técnicas de análise o sinal comprimido deve ter no máximo um fator de compressão de 3 e possuir pelo menos 6 pontos por ciclo, e o sinal reconstruído (ou original sem compressão) pelo menos 8 pontos por ciclo.

A análise da qualidade do primeiro conjunto de dados fornecido demonstrou que apenas 5 malhas são aptas para a análise, apesar disso foi optado por descartá-las devido à falta de informação sobre o critério de compressão adotado. O segundo conjunto de dados foi extraído direto na planta e, por isso, não apresenta compressão. A análise da qualidade dos dados demonstrou que não existe oscilação para 5 malhas, entre as 9 restantes, 6 apresentam quantidade insuficiente de dados por ciclo (menor que 8), restando apenas 3 para a análise da causa da oscilação, uma onde a vazão é a variável controlada e outras duas onde o nível é a variável controlada.

As três malhas foram testadas com os métodos propostos para a detecção do agarramento para sinais com referência variável e comparadas ao método de ajuste de curvas. O método de ajuste de curvas não pode identificar o agarramento em dois sinais com a presença da referência variável, já o método de inclinação dos picos não foi eficiente para a detecção do sinal com poucos dados por ciclo os demais resultados estão de acordo com o analisado por inspeção visual.

As malhas foram novamente testadas, dessa vez para a metodologia criada para o pré-processamento de dados, a aplicação para os quatro métodos de detecção apresentaram resultados compatíveis com a análise por inspeção visual, com exceção do método das correlações cruzadas para uma das malhas.

Dessa forma, apesar do pequeno número de malhas avaliadas, a metodologia para a detecção do agarramento em sinais com referência variável mostrou-se promissora para a aplicação direta em dados industriais.

Capítulo 6 – Considerações Finais

6.1 Conclusões

A identificação do agarramento em válvulas de controle para sinais com referência variável representa uma grande necessidade para a aplicação em plantas de grande porte. A identificação individual ou através de métodos intrusivos é inviável para processos com milhares de malhas, desta forma, o método ideal deve ser automático e de fácil aplicação. Este trabalho apresentou duas alternativas para a detecção automática de agarramento em sinais com referência variável: criação de novas técnicas de detecção e a criação de metodologia de pré-processamento para a adequação do sinal a métodos de detecção já existentes. Houve grande cuidado em ambas as alternativas para evitar a deformação do sinal, principalmente pelo tratamento inicial, já que isso poderia afetar a identificação futura.

Primeiramente, no Capítulo 3, duas técnicas para a detecção do agarramento para sinais com referência variável foram apresentadas, ambas diferenciam a causa da oscilação pela forma do sinal: forma triangular indica a presença do agarramento; forma senoidal indica problemas de sintonia ou distúrbios externos. O primeiro método é baseado na inclinação dos picos: para sinais de forma triangular, a inclinação do pico é aproximadamente a inclinação entre o pico e o vale anterior ou posterior, para sinais de forma senoidal, a inclinação é aproximadamente igual a zero. O segundo método é baseado na segmentação em zonas, para a segmentação igualmente espaçada entre cada pico e vale, a distribuição para o sinal de forma triangular pode ser diferenciada do sinal de forma senoidal, onde o segundo apresenta um maior número de pontos na zona superior e inferior.

Ambas as técnicas propostas foram comparadas ao método de detecção de ajuste de curvas (He *et al.*, 2007) através de dados simulados e de plantas. As simulações foram planejadas de modo a testar as técnicas a sinais com e sem agarramento para a ausência e presença da referência variável. Para sinais sem a presença de referência variável, o resultado foi semelhante ao encontrado para o método de ajuste de curvas, para sinais com a presença da referência variável as técnicas propostas apresentaram bons resultados, enquanto o método de ajuste de curvas falhou em grande parte das malhas analisadas.

Posteriormente, as técnicas foram testadas a dados industriais provenientes de uma refinaria e do trabalho de Jelali e Scali (2010), onde, novamente, foi comprovada a vantagem das técnicas propostas a sinais de referência variável. As técnicas foram também testadas para processos integradores, com a presença de atraso, com a presença de ruído e para sinais de diferentes amostragens, a partir disso, foi constatado que o método de inclinação dos picos não é eficiente para sinais com forte presença de ruído ou amostragem menor que 10 dados por ciclo, já o método de segmentação em zonas deve ser aplicado a sinais com pelo menos 6 dados por ciclo, para os demais casos, ambas as técnicas podem ser utilizadas da mesma forma.

No Capítulo 4, técnicas para o pré-processamento de dados para métodos de detecção do agarramento já existentes foram apresentadas. As técnicas visam à remoção do excesso do ruído, identificação dos picos e zeros, remoção da referência variável e localização dos zeros do sinal. A metodologia é utilizada de acordo com a necessidade de cada técnica de detecção do agarramento: para o método das correlações cruzadas, a remoção da referência variável é utilizada para sinais com alto nível de distúrbio; para o método de ajuste de curvas e das áreas a remoção do excesso de ruído, remoção da referência variável e identificação dos zeros é utilizada; para o método de Yamashita, a remoção do excesso do ruído ou a remoção do excesso de ruído podem ser utilizados com eficiência.

A metodologia para o pré-processamento de dados foi, também, testada a dados simulados e dados provenientes da indústria. Os dados simulados foram gerados a partir de funções de transferências comumente usadas em trabalhos anteriores. A metodologia foi testada aos métodos originais para sinais tratados e não-tratados, de modo geral o resultado foi: a possibilidade de identificação do agarramento a sinais com forte ruído e distúrbio e a diminuição da variação do índice do agarramento em relação ao ruído. Para os dados de planta, novamente foram utilizados os sinais fornecidos por Jelali e Scali (2010), nesse caso, os resultados encontrados foram semelhantes, alguns dos casos onde os resultados foram diferentes é observado claramente a falha no tratamento dos dados que, além de tudo, foi escolhido individualmente para a maioria dos casos.

No capítulo 5, a metodologia proposta foi testada a dados provenientes de uma unidade de hidrotratamento de uma refinaria. Foram disponibilizadas 107 malhas, onde 14 malhas com presença evidente de oscilação foram selecionadas para a análise da causa. Preliminarmente, a qualidade dos dados foi avaliada, onde um sinal é apto a ser analisado quando seu fator de compressão é menor que 3, existem, pelo menos, 6 dados por ciclo para o sinal comprimido e existem, pelo menos, 8 dados por ciclo para o sinal reconstruído ou original.

Após, dois conjuntos de dados foram analisados. O primeiro é composto de dados comprimidos, a análise da qualidade revelou problemas com a compressão, dessa forma, o conjunto foi descartado e novos dados foram requisitados. O segundo conjunto foi extraído diretamente da planta sem compressão, a análise da qualidade revelou que apenas 3 das 14 malhas possuíam oscilação e são aptas para a análise da causa. Aplicando a metodologia para a detecção em sinais de referência variável, foi demonstrado novamente a eficiência das técnicas em relação ao método de ajuste de curva, que resultou em erro em duas malhas. Para a aplicação da metodologia de pré-processamento, o

resultado foi satisfatório para todos os sinais, com exceção da aplicação para o método das correlações cruzadas em sinal com poucos dados.

Por fim, os objetivos estabelecidos para o presente trabalho foram alcançados e é possível concluir que tanto a metodologia para a detecção do agarramento em processos com referência variável e as técnicas de pré-processamento propostas possuem resultados eficiente para a aplicação industrial.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar do resultado satisfatório para ambas as alternativas adotadas para a detecção do agarramento em sinais de referência variável, alguns aspectos podem ser aprimorados, avaliados ou expandidos. Abaixo, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver metodologia para a detecção dos picos e vales para o caso de sinais com oscilação não regular;
- Avaliar as técnicas para o pré-processamento para outros métodos de detecção do agarramento;
- Avaliar a influência da referência variável a métodos de quantificação do agarramento, principalmente aos que quantificam através de técnicas de identificação de sistemas e, a partir disso, propor metodologia;
- Criar metodologia para a seleção automática de fragmento a serem analisado para dados industriais longos;
- Investigar mais detalhadamente o efeito da compressão dos dados e do tempo de amostragem na forma do sinal e, conseqüentemente, na análise da causa da oscilação.
- Avaliar características do sinal para outros problemas relacionados a processos industriais;
- Investigar o efeito do agarramento no processo como um todo e não apenas na variável controlada;

Referências

BIALKOWSKI, W. L. Dreams vs. reality: A view from both sides of the gap. *Control Systems*, 1992. p.283-294.

BRISTOL, E. H. **Data compression for display and storage**: Google Patents 1987.

BRÁSIO, A. S. R.; ROMANENKO, A.; FERNANDES, N. C. P. Modeling, Detection and Quantification, and Compensation of Stiction in Control Loops: The State of the Art. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 39, p. 15020-15040, 2014/10/01 2014a. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie501342y> >.

_____. Stiction Detection and Quantification as an Application of Optimization. In: MURGANTE, B.; MISRA, S., *et al* (Ed.). **Computational Science and Its Applications – ICCSA 2014: 14th International Conference, Guimarães, Portugal, June 30 – July 3, 2014, Proceedings, Part II**. Cham: Springer International Publishing, 2014b. p.169-179. ISBN 978-3-319-09129-7.

CHEN, S.-L.; TAN, K. K.; HUANG, S. Two-Layer Binary Tree Data-Driven Model for Valve Stiction. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 8, p. 2842-2848, 2008/04/01 2008. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie071218y> >.

CHOU DHURY, M. A. A. S. et al. Automatic detection and quantification of stiction in control valves. **Control Engineering Practice**, v. 14, n. 12, p. 1395-1412, 2006. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33747792355&partnerID=40&md5=4bcdd0a33a1b718927ca4784e590d1fb> >.

CHOU DHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L. **A data-driven model for valve stiction** 2004a.

_____. **Modelling valve stiction** 2004b.

CHOU DHURY, S. A. M. A.; SHAH, S. L.; THORNHILL, N. F. Impact of Data Compression and Quantization on Data-Driven Process Analyses. In: (Ed.). **Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction: Data Driven Approaches**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008a. p.45-65. ISBN 978-3-540-79224-6.

_____. Nonlinearities in Control Loops. In: (Ed.). **Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction: Data Driven Approaches**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008b. p.111-121. ISBN 978-3-540-79224-6.

CUADROS, M. A. D. S. L.; MUNARO, C. J.; MUNARETO, S. An improved algorithm for automatic quantification of valve stiction in flow control loops. *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, 2010, 14-17 March 2010*. p.173-178.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais: Projeto e análise de sistemas**. Bookman, 2004.

FARENZENA, M.; TRIERWEILER, J. O. **Modified PI Controller for Stiction Compensation**.: Proceedings of the 9th IFAC-DYCOPS: 791–796 p. 2010.

_____. **Valve Backlash and Stiction Detection in Integrating Processes**. *Advanced Control of Chemical Processes*. 8: 320-324 p. 2012.

_____. **Valve stiction evaluation using global optimization**: *Control Eng. Pract.* Control Eng. Pract.: 379–385 p. 2012.

FORSMAN, K.; STATTIN, A. A new criterion for detecting oscillations in control loops. *Control Conference (ECC), 1999 European, 1999, Aug. 31 1999-Sept. 3 1999*. p.2313-2316.

GARCIA, C. Comparison of friction models applied to a control valve. **Control Engineering Practice**, v. 16, n. 10, p. 1231-1243, 2008. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-46149092466&partnerID=40&md5=d586b3c52e54d139ff8d54820cfc409e> >.

GERRY, J.; RUEL, M. **How to measure and combat valve stiction on line**. Proceedings of the ISA International Fall Conference 2001.

HALE, J. C.; SELLARS, H. L. **Historical data recording for process computers**: *Chemical Engineering Progress*. 77 1981.

HE, Q. P. et al. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 13, p. 4549-4560, 2007. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34547380289&partnerID=40&md5=ee860a243841dfb7f913cbcf4097428a> >.

HE, Q. P.; WANG, J.; QIN, S. J. An Alternative Stiction-modelling Approach and Comparison of Different Stiction Models. In: JELALI, M. e HUANG, B. (Ed.). **Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops**: Springer London, 2010. cap. 3, p.37-59. (Advances in Industrial Control). ISBN 978-1-84882-774-5.

HORCH, A. A simple method for detection of stiction in control valves. **Control Engineering Practice**, v. 7, n. 10, p. 1221-1231, 1999. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033330566&partnerID=40&md5=5108be23a8f8c11e0909412c395cc2c3> >.

_____. Benchmarking Control Loops with Oscillations and Stiction. In: ORDYS, A.;UDUEHI, D., *et al* (Ed.). **Process Control Performance Assessment**: Springer London, 2007. cap. 7, p.227-257. (Advances in Industrial Control). ISBN 978-1-84628-623-0.

HORCH, A.; ISAKSSON, A. J. Detection of valve stiction in integrating processes. Control Conference (ECC), 2001 European, 2001, 4-7 Sept. 2001. p.1327-1332.

HÄGGLUND, T. A control-loop performance monitor. **Control Engineering Practice**, v. 3, n. 11, p. 1543-1551, 1995. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0029409368&partnerID=40&md5=a8991df979e9ae105aa4d7a719dc6cd1> >.

_____. A friction compensator for pneumatic control valves. **Journal of Process Control**, v. 12, n. 8, p. 897-904, 2002.

ISA. **Standard ANSI/ISA-75.26.01-2006. Control valve diagnostic data acquisition and reporting**. 2006.

JELALI, M. Estimation of valve stiction in control loops using separable least-squares and global search algorithms. **Journal of Process Control**, v. 18, n. 7-8, p. 632-642, 8// 2008. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152408000036> >. Acesso em: 2008/9//.

JELALI, M.; HUANG, B. **Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops**. 1. Springer-Verlag London, 2010.

JELALI, M.; SCALI, C. Comparative Study of Valve-stiction-detection Methods. In: JELALI, M. e HUANG, B. (Ed.). **Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods**. London: Springer London, 2010. p.295-358. ISBN 978-1-84882-775-2.

JIANG, H.; SHOUKAT CHOUDHURY, M. A. A.; SHAH, S. L. Detection and diagnosis of plant-wide oscillations from industrial data using the spectral envelope method. **Journal of Process Control**, v. 17, n. 2, p. 143-155, 2// 2007. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095915240600103X> >.

KANO, M. et al. **Practical model and detection algorithm for valve stiction**. IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems 2004.

KANO, M.; YAMASHITA, Y.; KUGEMOTO, H. Shape-based Stiction Detection. In: JELALI, M. e HUANG, B. (Ed.). **Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods**. London: Springer London, 2010. p.103-113. ISBN 978-1-84882-775-2.

KARNOPP, D. Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 107, n. 1, p. 100-103, 1985. ISSN 0022-0434. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1115/1.3140698> >.

KARRA, S.; KARIM, M. N. Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. **Control Engineering Practice**, v. 17, n. 8, p. 939-956, 8// 2009. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066109000392> >.

KARTHIGA, D.; KALAIVANI, S. **A new stiction compensation method in pneumatic control valves**. **International Journal of Electronics and Computer Science Engineering** 2012.

LEE, K. H.; REN, Z.; HUANG, B. **Novel closed-loop stiction detection and quantification method via**

system identification.: In Proceedings of the 3rd ADCONIP Conference, 2008.

LI, X. et al. Data-Driven Modeling of Control Valve Stiction Using Revised Binary-Tree Structure. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 1, p. 330-337, 2015/01/14 2015. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie5031369> >.

_____. The DCT-based oscillation detection method for a single time series. **Journal of Process Control**, v. 20, n. 5, p. 609-617, 2010. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77955296878&partnerID=40&md5=c6603c5730b0186462e4094ac6b8001b> >.

MIAO, T.; SEBORG, D. E. Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops. *Control Applications*, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on, 1999, 1999. p.359-364 vol. 1.

MITRA, S. K. K. **Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach**. McGraw-Hill Higher Education, 2000. 888 ISBN 0072321059.

OLSSON, H. **Control Systems with Friction**. 1996. Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control.

PAULONIS, M. A.; COX, J. W. A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement. **Journal of Process Control**, v. 13, n. 2, p. 155-168, 3// 2003. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152402000185> >.

ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Valve friction and nonlinear process model closed-loop identification. **Journal of Process Control**, v. 21, n. 4, p. 667-677, 4// 2011. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152410002271> >.

ROSSI, M.; SCALI, C. A comparison of techniques for automatic detection of stiction: simulation and application to industrial data. **Journal of Process Control**, v. 15, n. 5, p. 505-514, 8// 2005. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152404001192> >.

SALSBURY, I. T.; SINGHAL, A. Shape-based Stiction Detection Using Area Calculations. In: JELALI, M. e HUANG, B. (Ed.). **Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods**. London: Springer London, 2010. p.183-204. ISBN 978-1-84882-775-2.

SALSBURY, T. I.; SINGHAL, A. A new approach for ARMA pole estimation using higher-order crossings. *American Control Conference*, 2005. Proceedings of the 2005, 2005, 8-10 June 2005. p.4458-4463 vol. 7.

SCALI, C.; GHELARDONI, C. An improved qualitative shape analysis technique for automatic detection of valve stiction in flow control loops. **Control Engineering Practice**, v. 16, n. 12, p. 1501-1508, 12// 2008. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066108000798> >.

SHOUKAT CHOUDHURY, M. A. A.; JAIN, M.; SHAH, S. L. Stiction - definition, modelling, detection and quantification. **Journal of Process Control**, v. 18, n. 3-4, p. 232-243, 2008. Disponível em: <

<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-40749132202&partnerID=40&md5=e9a75dc581a078a74271d588c29c990e> >.

SILVA, B. C.; GARCIA, C. Comparison of Stiction Compensation Methods Applied to Control Valves. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 10, p. 3974-3984, 2014/03/12 2014. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie402468r> >.

SILVEIRA, R. P. **Novas metodologias para compressão de dados de processos e para o ajuste do Sistema PI**. 2012. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SINGHAL, A.; SALSBUURY, T. I. A simple method for detecting valve stiction in oscillating control loops. **Journal of Process Control**, v. 15, n. 4, p. 371-382, 6// 2005. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152404001106> >.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY. **Apparatus and method for Stiction Compensation in a Process Control System**. U.S. Patent 2007/0088446 A1 2007.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Stiction Compensation in Process Control Loops: A Framework for Integrating Stiction Measure and Compensation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 24, p. 9164-9174, 2005/11/01 2005. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie050748w> >.

_____. Approaches for efficient stiction compensation in process control valves. **Computers & Chemical Engineering**, v. 32, n. 1-2, p. 218-229, 1// 2008. ISSN 0098-1354. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135407001317> >.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R.; MILLER, R. A modified empirical mode decomposition (EMD) process for oscillation characterization in control loops. **Control Engineering Practice**, v. 15, n. 9, p. 1135-1148, 2007. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34248210658&partnerID=40&md5=07a4c8db5873d81cb238631b16ec70b9> >.

SRINIVASAN, R. et al. Control Loop Performance Assessment. 2. Hammerstein Model Approach for Stiction Diagnosis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 17, p. 6719-6728, 2005/08/01 2005. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie049026f> >.

STENMAN, A.; GUSTAFSSON, F.; FORSMAN, K. A segmentation-based method for detection of stiction in control valves. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, n. 7-9, p. 625-634, 2003. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0141637390&partnerID=40&md5=3abd2350e33e14d8f528796f15222af7> >.

THORNHILL, N. F. Finding the source of nonlinearity in a process with plant-wide oscillation. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 3, p. 434-443, 2005. ISSN 1063-6536.

THORNHILL, N. F.; HORCH, A. Advances and new directions in plant-wide disturbance detection and diagnosis. **Control Engineering Practice**, v. 15, n. 10, p. 1196-1206, 10// 2007. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066106001791> >.

THORNHILL, N. F.; HUANG, B.; ZHANG, H. Detection of multiple oscillations in control loops. **Journal of Process Control**, v. 13, n. 1, p. 91-100, 2// 2003. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152402000070> >.

THORNHILL, N. F.; HÄGGLUND, T. Detection and diagnosis of oscillation in control loops. **Control Engineering Practice**, v. 5, n. 10, p. 1343-1354, 1997. Disponível em: <

<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0342617639&partnerID=40&md5=e81ab58f19a10e05462f4461c6c95e28> >.

TIKKALA, V.-M.; ZAKHAROV, A.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L. A method for detecting non-stationary oscillations in process plants. **Control Engineering Practice**, v. 32, p. 1-8, 11// 2014. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066114001786> >.

WANG, G.; WANG, I. Quantification of valve stiction for control loop performance assessment. *Industrial Engineering and Engineering Management*, 2009. IE&EM '09. 16th International Conference on, 2009, 21-23 Oct. 2009. p.1189-1194.

WANG, J. Closed-Loop Compensation Method for Oscillations Caused by Control Valve Stiction. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 36, p. 13006-13019, 2013/09/11 2013. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie400308z> >.

XIA, C.; HOWELL, J.; THORNHILL, N. F. Detecting and isolating multiple plant-wide oscillations via spectral independent component analysis. **Automatica**, v. 41, n. 12, p. 2067-2075, 2005. ISSN 0005-1098.

XIANG, I.; ZHI, L.; LAKSHMINARAYANAN, S. A New Unified Approach to Valve Stiction Quantification and Compensation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 7, p. 3474-3483, 2009/04/01 2009. ISSN 0888-5885. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/ie800961f> >.

XIE, L.; CONG, Y.; HORCH, A. An improved valve stiction simulation model based on ISA standard tests. **Control Engineering Practice**, v. 21, n. 10, p. 1359-1368, 10// 2013. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066113001172> >.

YAMASHITA, Y. An automatic method for detection of valve stiction in process control loops. **Control Engineering Practice**, v. 14, n. 5, p. 503-510, 2006. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-30744433087&partnerID=40&md5=6adb9dd4f719066cbc206850f61a97a5> >.

Apêndice 1: Aplicação dos métodos de inclinação dos picos e segmentação em zonas para dados reais.

Detecção do agarramento pelos métodos de inclinação do pico e segmentação em zonas para as 93 malhas de controle de dados industriais fornecidos por Jelali e Scali (2010), onde o tipo de processo é dividido em autorregulatório (Self) e integrador (Int), a presença ou não de agarramento só é definida para os casos onde a presença é certa, ambas as informações foram retiradas do trabalho original de Jelali e Scali (2010), assim como os resultados para o método de ajuste de curva (Ajuste) e os comentários.

Os índices de agarramento para os métodos propostos são apresentados pelas colunas Inclín. e Segmen., onde NA indica o caso onde o método não é aplicável e Unc indica a presença incerta do agarramento. A presença de *setpoint* variável (Var. SP) e definida pela análise dados e a presença de referência variável (Var. Ref.) por inspeção visual.

Loop ID	Proc.	Agar.	Ajuste	Inclín.	Segmen.	Var. SP	Var. Ref.	Sl _{sl}	Sl _{zl}	Comentário
Bas1	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Não	-	-	Sem oscilação
Bas2	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Não	-	-	Sem oscilação
Bas3	Auto.	-	Sim	NA	NA	Não	Não	-	-	Sem oscilação*
Bas4	Auto.	Não	Não	Inc	Inc	Sim	Sim	0,432	0,288	-
Bas5	Auto.	-	Sim	Inc	Inc	Não	Não	-	-	Sem dados OP
Bas6	Auto.	-	Não	Sim	Sim	Não	Sim	0,645	0,425	-
Bas7	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	0,990	0,815	-
Bas8	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Não	-	-	Sem oscilação
CHEM1	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	0,721	0,869	-
CHEM2	Auto.	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,138	-0,264	-
CHEM3	Auto.	Não	Sim	Sim	Inc	Não	Sim	0,703	0,384	-
CHEM4	Int.	-	Não	Inc	Inc	Não	Sim	0,432	0,288	-
CHEM5	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	0,799	0,841	-
CHEM6	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	0,849	0,849	-
CHEM7	Auto.	-	Sim	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação*

Loop ID	Proc.	Agar.	Ajuste	Inclin.	Segmen.	Var. SP	Var. Ref.	Sl _{sl}	Sl _{zl}	Comentário
CHEM8	Auto.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Não	1,045	1,134	-
CHEM9	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM10	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,818	0,833	-
CHEM11	Auto.	Sim	Não	Sim	Inc	Não	Não	1,031	0,265	-
CHEM12	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,532	0,516	-
CHEM13	Auto.	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	0,032	0,071	-
CHEM14	Auto.	Não	Sim	Inc	Não	Sim	Sim	0,433	0,246	-
CHEM15	Auto.	-	Sim	Inc	Inc	Sim	Não	0,335	0,215	-
CHEM16	Auto.	Não	Sim	Inc	Sim	Sim	Não	0,466	0,498	-
CHEM17	Auto.	-	Não	Não	Não	Sim	Sim	0,232	0,075	-
CHEM18	Auto.	-	Sim	Inc	Não	Sim	Sim	0,332	0,043	-
CHEM19	Auto.	-	Sim	Não	Não	Sim	Não	0,293	0,064	-
CHEM20	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Sim	Não	0,637	0,241	-
CHEM21	Auto.	-	Inc	NA	NA	Sim	Não	-	-	Poucos pontos*
CHEM22	Auto.	-	Não	Não	Não	Sim	Não	0,199	-0,143	-
CHEM23	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,679	0,821	-
CHEM24	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	0,911	0,788	-
CHEM25	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,857	0,576	-
CHEM26	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,334	1,011	-
CHEM27	Int.	-	Sim	Sim	Inc	Não	Não	1,061	0,399	-
CHEM28	Auto.	-	Não	Não	Não	Não	Não	0,047	-0,028	-
CHEM29	Auto.	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim	0,175	-0,554	-
CHEM30	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	0,839	0,727	-
CHEM31	Auto.	-	NA	Na	Na	Sim	Sim	-	-	Poucos pontos
CHEM32	Auto.	Sim	Não	Inc	Não	Sim	Não	0,432	-0,390	-
CHEM33	Auto.	-	Inc	Não	Não	Sim	Sim	0,212	0,189	-
CHEM34	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	1,211	1,032	-
CHEM35	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Não	-	-	No oscillation
CHEM36	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,243	0,663	-
CHEM37	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,234	1,011	-
CHEM38	Auto.	-	Sim	Inc	Sim	Não	Não	0,442	0,596	-
CHEM39	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,401	0,859	-
CHEM40	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	1,157	1,337	-
CHEM41	Auto.	-	NA	Não	Não	Não	Não	0,139	-0,123	-
CHEM42	Auto.	-	Não	Inc	Não	Não	Sim	0,432	0,021	-
CHEM43	Auto.	-	Inc	Sim	Inc	Não	Sim	0,543	0,330	-
CHEM44	Auto.	-	Na	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM45	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM46	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM47	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM48	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM49	Auto.	-	Não	Não	Não	Não	Sim	0,011	0,091	-
CHEM50	Auto.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Sim	1,762	0,800	-
CHEM51	Int.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Sim	0,982	0,959	-
CHEM52	Int.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM53	Int.	-	NA	NA	NA	Não	Não	-	-	Sem oscilação

Loop ID	Proc.	Agar.	Ajuste	Inclin.	Segmen.	Var. SP	Var. Ref.	Sl _{sl}	Sl _{zl}	Comentário
CHEM54	Int.	-	Sim	Não	Sim	Não	Não	0,094	0,600	-
CHEM55	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,673	0,760	-
CHEM56	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM57	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM58	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM59	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM60	Auto.	-	Yes	Inc	Inc	Não	Sim	0,365	0,387	-
CHEM61	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Sim	-	-	Sem oscilação
CHEM62	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	0,922	0,774	-
CHEM63	Auto.	-	NA	NA	NA	Sim	Sim	-	-	Sem oscilação
PAP1	Auto.	-	Inc	Não	Não	Não	Não	0,209	0,209	-
PAP2	Auto.	Sim	Inc	Não	Não	Não	Não	0,170	0,030	-
PAP3	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,566	0,723	-
PAP4	Auto.	Não	Inc	Inc	Não	Não	Não	0,335	0,058	-
PAP5	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,492	1,063	-
PAP6	Int.	-	Não	Não	Não	Não	Não	0,090	0,018	-
PAP7	Auto.	Não	Inc	Inc	Não	Não	Não	0,451	0,044	-
PAP8	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	1,193	0,479	-
PAP9	Auto.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	0,277	-0,051	-
PAP10	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	1,384	0,995	-
PAP11	Auto.	-	Sim	Inc	Sim	Não	Não	0,321	0,590	-
PAP12	Auto.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	1,197	0,901	-
PAP13	Int.	-	Não	Não	Não	Não	Não	0,052	0,023	-
POW1	Int.	-	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,527	0,540	-
POW2	Int.	-	Inc	Não	Não	Não	Não	0,262	-0,009	-
POW3	Int.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Não	1,426	1,191	-
POW4	Int.	-	Inc	Sim	Inc	Não	Não	0,805	0,310	-
POW5	Auto.	-	NA	NA	NA	Não	Não	-	-	OP saturado
MIN1	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	0,959	0,737	-
MET1	Auto.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Sim	1,453	1,234	-
MET2	Auto.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Sim	1,283	1,048	-
MET3	Auto.	-	Inc	Sim	Sim	Não	Sim	0,976	1,087	-

* Adicionados pelo autor e não presentes em Jelali e Scale (2010)

Apêndice 2: Aplicação da metodologia de pré-processamento de sinais para dados reais.

Aplicação da metodologia para o pré-processamento de sinais para a detecção do agarramento em técnicas já existentes as 93 malhas fornecidos por Jelali e Scali (2010), onde o tipo de processo é dividido em autorregulatório (Self) e integrador (Int), a presença ou não de agarramento só é definida para os casos onde a presença é certa. Os resultados para os métodos de correlação cruzada, ajuste de curva, método das áreas e método de Yamashita foram retirados do próprio trabalho de Jelali e Scali (2010).

A aplicabilidade da metodologia é definida para os sinais OP (Met. OP) e PV (Met. PV) e o índice para os quatro métodos considerando o pré-processamento são calculados e apresentados na tabela.

Loop ID	Process	Stiction	Var. SP	Var. Ref.	Correlação		Ajuste		Áreas		Yamashita		Comentários	
					Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Benchmark	Próprios
Bas1	Auto.	-	Sim	Não	NA	NA	NA	NA	0,07	0,26	-	-	Sem oscilação	-
Bas2	Auto.	-	Sim	Não	NA	NA	NA	NA	0	-1	-	-	Sem oscilação	-
Bas3	Auto.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,71	NA	0	-1	-	-	-	Sem oscilação
Bas4	Auto.	Não	Sim	Sim	Sim	Inc	0,74	0,5	0	1,02	-	-	Escolha de fragmento ([123413, 125413])	
Bas5	Auto.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,77	NA	-1	-1	-	-	Sem dados OP	-
Bas6	Auto.	-	Não	Sim	Não	Não	0,4	0,26	0	0,17	-	-	-	-
Bas7	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,86	0,8	1	2,05	-	-	-	-
Bas8	Auto.	-	Sim	Não	NA	NA	NA	NA	0	-1	-	-	Sem oscilação	-
CHEM1	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	0,83	0,86	0,97	1,36	0,136	0,398	-	-
CHEM2	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Inc	0,63	0,71	-1	0,29	0,286	0,317	-	-
CHEM3	Auto.	Não	Não	Sim	Sim	Sim	0,68	0,64	0	0,83	-	-	-	-
CHEM4	Int.	-	Não	Sim	-99	-99	0,34	0,29	-1	0,04	-	-	-	-
CHEM5	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,77	0,71	-1	1,03	0,061	0,304	-	-
CHEM6	Auto.	Sim	Não	Sim	Inc	Não	0,74	0,64	0,03	0,3	0,264	0,498	-	-
CHEM7	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	0,88	NA	-1	-1	-	-	-	Sem oscilação
CHEM8	Auto.	-	Não	Não	NA	NA	0,56	0,87	-1	0,48	-	-	-	-
CHEM9	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	NA	NA	-1	-1	-	-	Sem oscilação	-
CHEM10	Auto.	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,91	0,8	1	2,46	-	-	-	-
CHEM11	Auto.	Sim	Não	Não	Inc	Inc	0,37	0,25	0,19	0,07	0,304	0,256	-	-
CHEM12	Auto.	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,86	0,87	0,45	0,63	0,267	0,311	-	-
CHEM13	Auto.	Não	Não	Sim	Não	Não	0,33	0,34	0	0,09	-	-	-	-
CHEM14	Auto.	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	0,66	0,47	-1	0,37	0,503	0,565	-	-
CHEM15	Auto.	-	Sim	Não	Sim	Sim	0,61	0,54	-1	0,43	-	-	-	Duas frequências (PV)
CHEM16	Auto.	Não	Sim	Não	Sim	Sim	0,63	0,42	-1	0,58	-	-	-	-
CHEM17	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Inc	0,28	0,25	-1	0,19	-	-	-	-
CHEM18	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Não	0,64	0,31	0	0,12	0,333	0,318	-	-
CHEM19	Auto.	-	Sim	Não	Sim	Inc	0,67	0,59	-1	0,05	0,391	0,456	-	-

Loop ID	Process	Stiction	Var. SP	Var. Ref.	Correlação		Ajuste		Áreas		Yamashita		Comentários	
					Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Benchmark	Próprios
CHEM20	Auto.	-	Sim	Não	Sim	Não	0,68	0,65	-1	-1	0,179	0,427	-	-
CHEM21	Auto.	-	Sim	Não	Não	Não	0,52	0,62	-1	-1	0	0,043	-	Não regular
CHEM22	Auto.	-	Sim	Não	Sim	Inc	0,36	0,36	1	0,07	0,628	0,799	-	-
CHEM23	Auto.	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,95	0,89	0,27	0,78	0,167	0,45	-	-
CHEM24	Auto.	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	0,62	0,67	0	0,18	0,193	0,729	-	-
CHEM25	Auto.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,87	0,75	0	2,09	-	-	-	-
CHEM26	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,66	0,83	0,21	0,11	-	-	-	-
CHEM27	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,63	0,67	0,03	0,63	-	-	-	-
CHEM28	Auto.	-	Não	Não	Sim	Sim	0,07	0,1	0,77	0,16	-	-	-	-
CHEM29	Auto.	Sim	Sim	Sim	Sim	Inc	0,38	0,61	0	-0,07	0,432	0,464	-	Redução ([3600:4007])
CHEM30	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Inc	0,86	0,78	1	0,71	0,043	0,271	-	Redução ([8640:9540])
CHEM31	Auto.	-	Sim	Sim	Não	Não	NA	NA	-1	-1	0,053	0,0235	Poucos pontos	-
CHEM32	Auto.	Sim	Sim	Não	Inc	Inc	0,22	0,19	0	-0,28	0,486	0,469	-	-
CHEM33	Auto.	-	Sim	Sim	Não	Não	0,53	0,62	-1	0,95	0	0,052	-	-
CHEM34	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Inc	0,6	NA	-1	-1	0,008	0,079	-	Não oscilatório
CHEM35	Auto.	-	Sim	Não	Inc	Inc	NA	NA	0,13	0,46	0,121	0,353	Sem oscilação	Não regular
CHEM36	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,72	0,82	0,88	0,24	-	-	-	-
CHEM37	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,69	0,66	-1	0,35	-	-	-	-
CHEM38	Auto.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,9	0,85	1	0,34	-	-	-	-
CHEM39	Auto.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,65	0,62	0	0,05	-	-	-	-
CHEM40	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,61	NA	-1	-1	0,019	0,145	-	Não regular
CHEM41	Auto.	-	Não	Não	Não	Não	NA	NA	0	0,03	0,081	0,194	-	-
CHEM42	Auto.	-	Não	Sim	Não	Não	0,2	NA	0	0,22	-	-	-	-
CHEM43	Auto.	-	Não	Sim	Não	Não	0,31	NA	-1	0,1	0	0,147	-	Duas frequências (OP)
CHEM44	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	0,62	0,16	0,31	0	0,41	Sem oscilação	-
CHEM45	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,009	0,229	Sem oscilação	Múltipla oscilação
CHEM46	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,005	0,162	Sem oscilação	Múltipla oscilação
CHEM47	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0	0,147	Sem oscilação	Múltipla oscilação

Loop ID	Process	Stiction	Var. SP	Var. Ref.	Correlação		Ajuste		Áreas		Yamashita		Comentários	
					Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Benchmark	Próprios
CHEM48	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,006	0,04	Sem oscilação	Múltipla oscilação
CHEM49	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Sim	0,14	0,27	0	-0,09	0,128	0,523	-	-
CHEM50	Auto.	-	Não	Sim	Não	Não	0,56	0,68	-1	1,1	0	0,084	-	Não regular (PV)
CHEM51	Int.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,56	0,61	-1	0,33	0,085	0,266	-	-
CHEM52	Int.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	0,52	0,011	0,085	Sem oscilação	Múltipla oscilação
CHEM53	Int.	-	Não	Não	NA	NA	NA	0,69	-1	1,46	0,005	0,042	Sem oscilação	Não regular (PV)
CHEM54	Int.	-	Não	Não	Inc	Inc	0,69	0,58	0	0,29	0,023	0,232	-	-
CHEM55	Int.	-	Não	Não	Sim	Sim	0,75	NA	0.12	0,27	0,022	0,354	-	-
CHEM56	Auto.	-	Sim	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,121	0,303	Sem oscilação	-
CHEM57	Auto.	-	Não	Sim	Sim	NA	NA	NA	-1	-1	0,179	0,239	Sem oscilação	-
CHEM58	Auto.	-	Sim	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,043	0,246	Sem oscilação	-
CHEM59	Auto.	-	Sim	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0,202	0,318	Sem oscilação	-
CHEM60	Auto.	-	Não	Sim	Sim	Sim	0,67	0,69	0.01	0,99	0,399	0,556	-	Não regular
CHEM61	Auto.	-	Não	Sim	NA	NA	NA	NA	-1	-1	0	0,286	Sem oscilação	-
CHEM62	Auto.	-	Sim	Sim	Inc	Não	0,66	0,69	-1	-1	0,195	0,383	-	Não Regular (PV)
CHEM63	Auto.	-	Sim	Sim	Não	NA	NA	NA	-1	-1	0,31	0,328	Sem oscilação	Poucos dados (5)
PAP1	Auto.	-	Não	Não	Inc	Sim	0,47	0,58	0,99	0,7	0,339	0,284	-	-
PAP2	Auto.	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,53	0,51	1	0,85	0,404	0,476	-	-
PAP3	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,7	0,91	0,39	0,23	-	-	-	-
PAP4	Auto.	Não	Não	Não	Não	Não	0,59	0,7	0,96	0,66	-	-	-	-
PAP5	Auto.	Sim	Não	Não	Sim	Sim	0,68	0,66	0	0,05	-	-	-	Redução ([9000 12880])
PAP6	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,07	0,13	0,07	-0,04	-	-	-	-
PAP7	Auto.	Não	Não	Não	Não	Não	0,54	NA	0,35	0,09	0,048	0,282	-	Não Regular
PAP8	Int.	-	Não	Sim	-99	-99	0,6	NA	-1	-1	-	-	-	Múltipla oscilação
PAP9	Auto.	Não	Não	Não	Não	Não	0,34	0,31	0,03	0,06	-	-	-	-
PAP10	Int.	-	Não	Sim	-99	-99	0,62	NA	-1	-1	-	-	-	Distúrbio Elevado
PAP11	Auto.	-	Não	Não	Inc	Não	0,65	NA	0	-1	0,093	0,485	-	Não regular

Loop ID	Process	Stiction	Var. SP	Var. Ref.	Correlação		Ajuste		Áreas		Yamashita		Comentários	
					Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Bench	Met.	Benchmark	Próprios
PAP12	Auto.	-	Não	Não	Sim	Sim	0,78	NA	-1	0,91	0,24	0,364	-	Não Regular
PAP13	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,34	0,11	0	0,09	-	-	-	-
POW1	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,69	0,29	0	0,21	-	-	-	Redução ([4320, 4760])
POW2	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,5	0,42	0	-0,14	-	-	-	Redução ([4320 5360])
POW3	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,54	0,63	-1	0,18	-	-	-	-
POW4	Int.	-	Não	Não	-99	-99	0,53	0,54	0	0,04	-	-	-	-
POW5	Auto.	-	Não	Não	-99	-99	NA	NA	-1	0,58	-	-	OP saturado	-
MIN1	Auto.	Sim	Não	Não	Inc	Inc	0,67	NA	0,97	1,21	-	-	-	Múltipla oscilação
MET1	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,54	NA	-1	0,87	-	-	-	Duas frequências (OP)
MET2	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Sim	0,57	0,62	0	-1	-	-	-	Múltipla oscilação (PV)
MET3	Auto.	-	Não	Sim	Inc	Inc	0,59	NA	0	-1	-	-	-	Múltipla oscilação

Apêndice 3: Breve Revisão sobre o Processamento Digital de Sinais

Com o avanço dos computadores digitais, o campo de aplicação do processamento digital de sinais (DSP) cresceu em larga proporção durante as últimas quatro décadas. O sinal carrega consigo informações e cabe ao processamento de sinais a extração de informações relevantes do mesmo. Dessa forma, processamento de sinais envolve a representação matemática do sinal assim como algoritmos para a extração das informações (Mittra, 2000).

A análise do agarramento é conduzida a partir de dados provenientes de plantas reais, a obtenção de informações desses sinais normalmente não é um processo simples. Considerando dados industriais, sinais medidos são corrompidos pela presença de ruídos causados por falhas em medidor, campos eletromagnéticos causados pela presença de motores elétricos, por exemplo. Além disso, o sinal é corrompido pela presença de distúrbios externos não medidos como mudanças da temperatura ambiente, variação de carga entre outros.

Conseqüentemente, o processamento de sinais deve ser considerado para a remoção de interferentes excessivos no sinal a ser analisado ou para a utilização direta na análise do agarramento. Neste trabalho, alguns conceitos e algoritmos foram utilizados, entre eles, a transformada de Fourier, filtros e a correlação cruzada.

A3.1. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é a representação do sinal no domínio da frequência equivalente a soma infinitesimal de funções sinusoidais complexas. A representação para tempo discreto é mostrada pela Equação A3.1.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (\text{A3.1})$$

onde n representa os instantes discretos, $x(n)$ uma sequência contínua para valores de tempo em instantes discreto n , N define a resolução da transformada, e k a frequência.

A aplicação da transformada discreta de Fourier (DFT) é extremamente vasta e representa a base para o processamento digital de sinais. Na análise do agarramento, a DFT pode ser utilizada na obtenção da periodicidade do sinal, na identificação do distúrbio, na quantificação do ruído e, por fim, no projeto do filtro.

A3.2. Filtros Digitais

A utilização de filtros é essencial para a análise de sinais provenientes de plantas. A presença de ruído e distúrbio mascara o sinal original dificultando a análise. Entre os grupos de filtros digitais mais utilizados estão os filtros não-recursivos e filtros recursivos.

Filtros não-recursivos, também chamados de filtros de resposta ao impulso de duração finita (ou FIR, do inglês *Finite-duration Impulse Response*) são filtros que dependem apenas do valor de entrada do sinal, como representado pela Figura **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Considerando que filtros FIR podem ser projetados para fornecer resposta com fase linear exata e por serem sempre estáveis, independente dos coeficientes, estes filtros são preferidos para a maioria das aplicações (Mitra, 2000).

Filtros ideais, ou seja, aqueles que zeram frequências indesejáveis, possuem duração infinita, o que torna a aplicação impraticável, uma alternativa para o problema é limitar o comprimento do filtro apenas considerando valores centrais. Este truncamento adiciona pontos de descontinuidade, o que implica na formação de ondulações de elevada amplitude devido ao fenômeno de Gibbs na série de Fourier. Assim, ao invés do truncamento, o impulso é a multiplicação da mesma por janelas que são projetadas de modo a introduzir o mínimo desvio em relação à resposta de frequência ideal. Existem vários tipos de janelas que devem ser utilizadas de acordo com o objetivo do filtro, alguma delas são: janela retangular, triangular, de Hamming, de Blackman e Kaiser (Diniz *et al.*, 2004).

Filtros recursivos, também chamados de filtros com resposta ao impulso de duração infinita (ou IIR, do inglês *Infinite-duration Impulse Response*), são filtros que dependem do sinal de saída do próprio filtro além do sinal de entrada, a Figura A3.1(B) é uma representação simplificada deste tipo de filtro. Filtros IIR são normalmente utilizados em aplicações online devido ao menor número de multiplicações quando comparado a filtros FIR. Filtros IIR são baseados em filtros analógicos, suas aproximações convencionais, novamente dependendo do objetivo da aplicação, as principais aproximações são Butterworth, Chebyshev e elíptica (Diniz *et al.*, 2004).

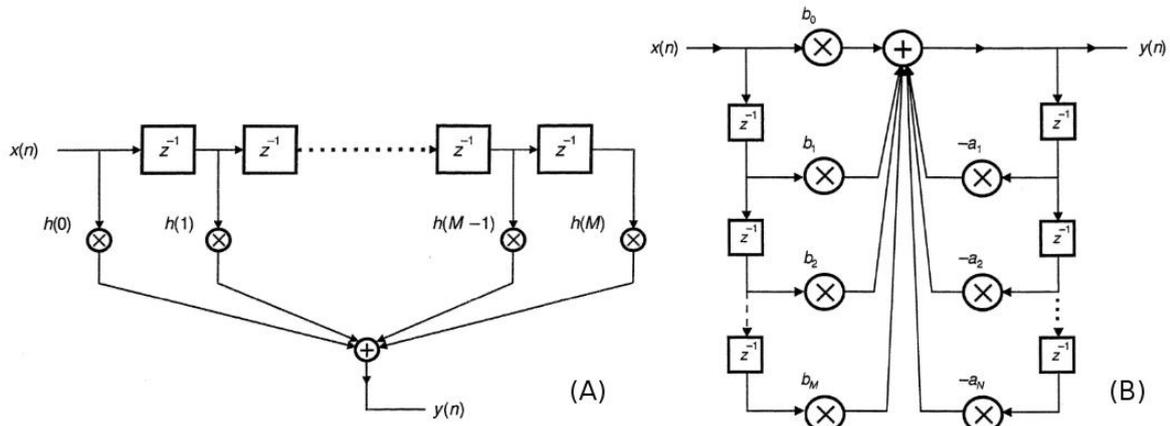


Figura A3.1: Filtros digitais: (A) forma direta para o filtro FIR; (B) forma direta para o filtro IIR. Adaptado de Diniz *et al.* (2004)

Para ambos os filtros, existe uma classificação que é definida de acordo com a faixa de frequência passante:

- Passa-baixa é utilizado para remover altas frequências (ruído);
- Passa-alta é empregado na remoção de baixas frequências (distúrbio);
- Passa-faixa utilizado para remover altas e baixas frequências mantendo frequências intermediárias;
- Rejeita-faixa usado para remover frequências intermediárias.

A3.3. Função de correlação

A função de correlação mede a similaridade entre dois sinais em função do atraso. E é calculada pela Equação A3.2:

$$r_{uy}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}) * (y_{i-\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{i-\tau} - \bar{y})^2}} \quad (\text{A3.2})$$

onde τ é o horizonte de predição, n a quantidade de dados, u_i e y_i os sinais a serem correlacionados para o atraso i , \bar{u} e \bar{y} o valor médio dos sinais.

A correlação entre um sinal com ele mesmo é conhecida como função de autocorrelação (ACF) e pode ser calculada pela Equação A3.3.

$$ACF(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}) * (u_{i-\tau} - \bar{u})}{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} \quad (\text{A3.3})$$

A função de correlação e de autocorrelação são utilizadas em métodos de detecção de oscilação e do agarramento, como já especificado anteriormente.

Apêndice 4: Métodos de compressão de dados do tipo *piecewise linear*

A compressão de dados é fundamental para a redução de custos com armazenamento e transmissão dos dados de processos. Longos históricos de dados que devem ser mantidos por questões legislativas ou para futuras inspeções, por exemplo, requerem altos investimentos em mídias físicas de armazenamento. A transmissão de dados de processo entre pontos remotos (envio de dados de ponto de extração de petróleo *offshore* para a central *onshore*, por exemplo) podem demandar altos custos com transmissão (Choudhury *et al.*, 2008a). Entre os algoritmos de compressão de dados, os mais utilizados industrialmente são os do tipo *piecewise linear*, pois estes podem ser aplicados em tempo real (Silveira, 2012). Quatro algoritmos para a compressão de dados foram avaliados a sinais do tipo senoidal, triangular e quadrado no Capítulo 5 deste trabalho, são eles: *Boxcar*, *Backslope*, *Boxcar/Backslope* e *Swinging Door*. Uma breve descrição desses algoritmos é descrita abaixo:

A4.1. Algoritmo *Boxcar*, *Backslope* e *Boxcar/Backslope*

O algoritmo *Boxcar*, desenvolvido por Hale e Sellars (1981) armazena um ponto apenas quando a diferença entre o valor atual e o anteriormente armazenado é maior que uma dada tolerância fornecida pelo usuário. Esse algoritmo é eficiente para processos onde o sinal permanece em estado estacionário, sem tendência. Para sinais com referência variável, os mesmos autores apresentam o algoritmo *Backslope* onde o ponto atual é predito através da interpolação linear entre os dois últimos pontos gravados se o valor atual está fora da tolerância atribuída, então o ponto atual é salvo. Por fim, para o algoritmo *Boxcar/Backslope* um ponto é armazenado apenas se este viola o critério do algoritmo *Boxcar* e *Backslope* ao mesmo tempo.

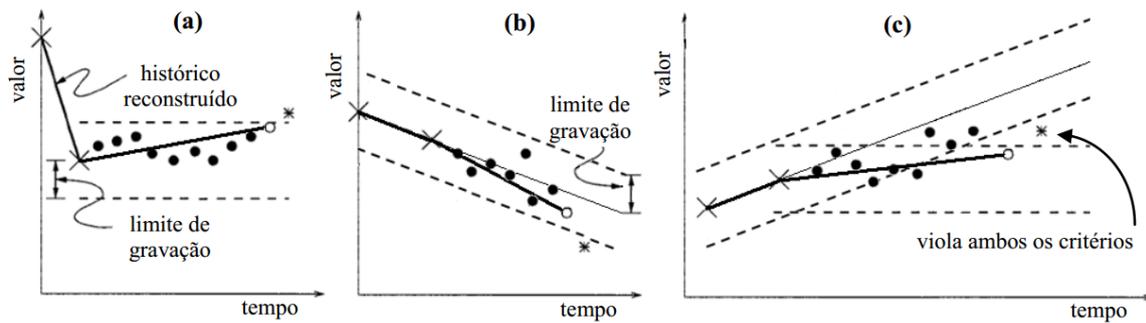


Figura A4.1: Demonstração de aplicação dos algoritmos para a compressão de dados *Boxcar*, *Backslope* e *Boxcar/Backslope* (Fonte: Silveira, 2012)

A3.2. Algoritmo *Swinging Door*

Para o algoritmo *Swinging Door* (Bristol, 1987) duas portas são criadas cujo suporte está a uma distância D do último ponto salvo, as portas estendem-se do suporte a um ponto e abrem-se conforme novos pontos são avaliados. As portas apenas se deslocam no sentido de abertura, quando o ângulo entre elas for maior que 180° as portas se fecham, o ponto anterior é gravado e o processo começa novamente.

A Figura A4.2 mostra o procedimento de compressão pelo algoritmo: o primeiro ponto i é salvo; as portas são criadas e estendem-se do suporte ao ponto a ; com a aquisição do ponto b ambas as portas se abrem; para o ponto c e d apenas a porta inferior se abre; com a adição do ponto e as portas se abrem formando um ângulo maior que 180° , salvando o ponto d e reiniciando o procedimento.

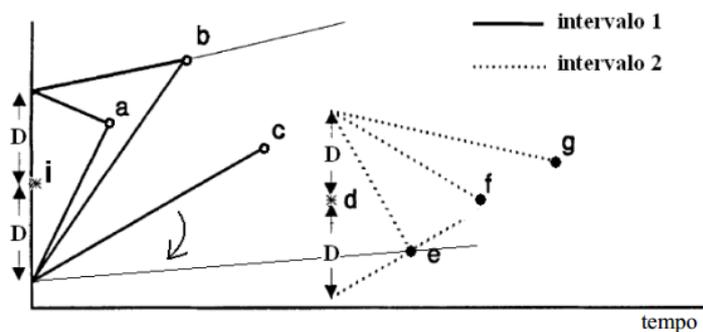


Figura A4.2: Demonstração de aplicação do algoritmo *Swinging Door*. (Fonte: Silveira, 2012)

Apêndice 5: Quantificação da compressão de dados.

Apesar da redução dos custos com armazenamento e transmissão, a compressão causa a perda de informações que podem ou não interferir nos resultados de análises posteriores. De modo a quantificar a compressão e classificar os dados a serem analisados no Capítulo 5, a metodologia proposta por Choudhury *et al.* (2008a) foi implementada e utilizado para quantificar o grau de compressão dos dados.

Sabendo que a reconstrução dos dados é o processo onde os dados comprimidos são restaurados à taxa de amostragem que possuíam antes da compressão e que a restauração é feita através da interpolação linear, a quantificação da compressão de dados pode ser obtida pela contagem do número de zeros da segunda derivada dos dados reconstruídos. Considerando o cálculo da segunda derivada como o apresentado pela Equação A5.1:

$$\Delta(\Delta\hat{y})_i = \frac{(\hat{y}_{i+1}-\hat{y}_i)/h - (\hat{y}_i - \hat{y}_{i-1})/h}{h} = \frac{\hat{y}_{i+1} - 2\hat{y}_i + \hat{y}_{i-1}}{h^2} \quad (\text{A5.1})$$

onde \hat{y} é o sinal reconstruído e h é o intervalo de amostragem. O intervalo de i varia de 2 a $N-1$, onde N é o número de amostras. Suponha que o sinal original possua N pontos e após a compressão existam m valores e, desta forma, $m - 1$ segmentos lineares. Se o sinal reconstruído é diferenciado duas vezes, existirá $n = N - m$ valores iguais a zero. Assim, o fator de compressão pode ser calculado da seguinte forma:

$$CF_{est} = \frac{N}{m} \quad (\text{A5.2})$$

Por exemplo, se 10 pontos amostrados ($N = 10$) são convertidos para 4 valores armazenados ($m = 4$), então haverá 3 segmentos de reta para os dados reconstruídos, dessa forma haverá $10 - 4 = 6$ valores onde a segunda derivada será igual a zero ($n = 6$) e o fator de compressão calculado pela Equação A5.2 será igual a 2,5 ($CF_{est} = 2,5$). Esse método pode ser expandido para a reconstrução dos dados por polinômio de ordem mais elevada. Considerando, por exemplo, a reconstrução por polinômio de ordem 3 a aplicação da quarta derivada neste sinal resultaria em zero para todos os valores, com a exceção dos pontos que não foram gerados pela interpolação.

O artigo, por fim, recomenda que dados reconstruídos com fator de compressão maior que 3 ($CF_{est} > 3$) não sejam utilizados para análise devido à grande perda de informação pela compressão.