UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Comparação e proposição de métodos de detecção de agarramento em válvulas de controle

Autor: Marcos Gerchman

Orientador: Marcelo Farenzena

Porto Alegre, janeiro de 13

Sumário

1 Introdução 1

2 Revisão Bibliográfica 2

2.1 Definição de Agarramento 2

2.2 Modelos de Agarramento 3

2.2.1 Modelos Físicos 3
2.2.2 Modelos baseados em dados de planta 4

2.3 Métodos de detecção de Agarramento 6

2.3.1 Yamashita (2006) 6
2.3.2 Correlação Cruzada de Horch (1999) 8
2.3.3 Diagnóstico baseado em ajuste de curva 10
2.3.4 Ajuste Elíptico de plot PV-OP, Choudhury et al.(2006) 12

3 Materiais e Métodos 14

3.1 Primeiro Método Proposto: Inclinação da curva MV-OP 14

3.2 Segundo Método Proposto: Cálculo do agarramento aparente 15

3.3 Terceiro Método Proposto: Faixas de derivada de OP 16

4 Resultados 18

4.1 Crítica aos métodos atuais 18

4.1.1 Yamashita 18
4.1.2 Método da Correlação Cruzada 19
4.1.3 Método de ajuste por curva senoidal ou triangular 20
4.1.4 Método por ajuste de elipse 21

4.2 Resultados de métodos propostos 21

4.2.1 Primeiro Método Proposto 21
4.2.2 Segundo Método Proposto 24
4.2.3 Terceiro Método Proposto 25

5 Conclusões e Trabalhos Futuros 29

6 Referências 30

Agradecimentos

Ao fim de cinco anos de curso, o apoio da família e amigos na superação de obstáculos e desafios foi essencial para a conclusão deste trabalho. Além disso, a ajuda do professor Marcelo Farenzena na orientação do trabalho foi de extrema qualidade e empenho, de modo a alcançarmos juntos o objetivo de término deste ciclo.

Obrigado a meu irmão Julio, que apesar de morar longe sempre esteve presente no meu desenvolvimento; ao meu irmão gêmeo Daniel, que não pode comparecer à formatura devido a seu intercâmbio para a Inglaterra; aos meus pais, que tiveram que aguentar seu filho em épocas de tensão; ao grupo BP, que proporcionou momentos de diversão ao longo dos anos; à minha namorada e sua família, por seu carinho e conforto.

Resumo

O agarramento é o fenômeno de alta fricção em válvulas de controle, que resulta em oscilações em ciclo no sistema, e consequentes perdas de qualidade de produto e despesas operacionais.

A fim de descrever o seu funcionamento, foram criados modelos baseados em balanços de força na válvula e outros que necessitam apenas de dados operacionais, como a saída do controlador, variável de processo e posição da haste da válvula, para a modelagem do evento.

A observação de padrões de comportamento das variáveis operacionais de planta resultou na criação de métodos de detecção de agarramento, porém todos com suas limitações de uso e desempenho.

Assim, além de realizar uma análise crítica dos métodos atualmente presentes na literatura, foram propostas três novas alternativas para a detecção do evento, baseados em dados de planta. Porém, o desempenho destes não foi satisfatório, sendo necessárias assim novas pesquisas e ideias para a melhor detecção de agarramento, com menos limitações e de forma mais abrangente.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Fluxograma de uma malha *feedback* com suas principais variáveis..... 2

Figura 2.2: Típico diagrama Input-Output de uma válvula com agarramento. 3

Figura 2.3: Fluxograma descrevendo o modelo proposto por Kano et al. (2004) (Adaptado de Kano et al., 2004). 5

Figura 2.4: Fluxograma descrevendo o modelo proposto por He et al. (2007) 6

Figura 2.5: Representações simbólicas de comportamentos nas séries MV e OP: crescente (I), invariável (*S*) e decrescente (*D*)..... 6

Figura 2.6: Ilustração quantitativa para comportamentos típicos de agarramento nos diagramas MV-OP (Yamashita 2006). 8

Figura 2.7: Típicos gráficos de *u(t)* e *y(t)* em função de tempo, e funções de correlação cruzada no caso com (a) e sem agarramento (b) (adaptado de Horch, 1999). 9

Figura 2.8: Definições das principais variáveis da CCF (Horch 1999). 10

Figura 2.9: (a) Aproximação Senoidal; (b) Aproximação Triangular. 11

Figura 2.10: Ajuste elíptico em gráfico PV-OP, após etapas preliminares. Em vermelho, o agarramento aparente. 13

Figura 3.1: Ambiente de Simulink no MATLAB, utilizado para simulação de dados de agarramento. 14

Figura 3.2:..... 16

Gráfico PV-OP normalizado contendo as informações necessárias para cálculo proposto de agarramento aparente. 16

Figura 3.3: Comportamento de OP (verde) e sua derivada (azul) em função do tempo para caso industrial. 16

Figura 4.1: Exemplo industrial de válvula sofrendo agarramento. Em verde está representado o OP normalizado, em azul a derivada de OP (*dOP*) e em vermelho, os desvios padrões de dOP. 18

Figura 4.2: Típico padrão MV-OP de agarramento quando o ganho do controlador é negativo. 19

Figura 4.3: Sistemas caracterizados com agarramento por Yamashita (Yam) e PCU (Manum 2006). 19

Figura 4.4: Função de correlação cruzada inicialmente ímpar e, após alteração dos parâmetros do controlador Kc e Ti, se tornando par. 20

Figura 4.5: Resultado de simulação de agarramento no MATLAB, com parâmetros S=0.5 e J=0.3, onde a curva de OP não possui padrão nem triangular nem senoidal. 20

Figura 4.6: Ciclo limite em OP normalizado camuflado por ruído com amplitude de 0.1.. 23

Figura 4.7: Diagrama MV-OP obtido após simulação de dados, com ruído de amplitude de 0,001, S=0,1 e J=0,6. 23

Figura 4.8: Ciclo limite de oscilação de MV, alterado pela presença de ruído. 24

Figura 4.9: Distribuição de pontos em faixas, segundo o comportamento da derivada primeira de OP, em caso industrial 25

Figura 4.10: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando não há agarramento e ruído. ... 26

Figura 4.11: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando não há agarramento e ruído, porém com mau ajuste do controlador. 26

Figura 4.12: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando há agarramento e ruído. 27

Figura 4.13: Distribuição de pontos baseada na derivada de OP, em 6 faixas, sem agarramento, com ruído..... 28

Figura 4.14: Distribuição de pontos baseada na derivada de OP, em 6 faixas, com agarramento, com ruído..... 28

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Representação de comportamentos dos sinais OP e MV. 7

Tabela 2.2: Típicos padrões de agarramento em variáveis em função do tempo, para diferentes processos (Srinivasan & Rengaswamy, 2005). 11

Tabela 4.1: Compilação de dados obtidos para simulações, variando a amplitude do ruído, e parâmetros de agarramento. À esquerda, resultados obtidos para o método proposto. À direita, primeiro parâmetro de Yamashita. 21

Tabela 4.2: Porcentagem de resultados corretos para detecção de agarramento utilizando o Método 1 proposto e Yamashita. 22

Tabela 4.3: Resultados obtidos para o segundo método proposto, com variação do sinal de ruído e parâmetros S e J. 24

1 Introdução

Processos industriais possuem centenas a milhares de malhas de controles, conectadas de modo a garantir as especificações e qualidade do produto final, além de estabilidade e segurança da planta. Cada malha é responsável por manter variáveis de processo como nível, vazão, pressão e temperatura dentro de uma faixa de operação. O elemento de controle final mais comumente utilizado é a válvula de controle.

Uma válvula de controle deve ser capaz de manipular o fluido escoante de modo a compensar os distúrbios de carga, e manter a variável de processo o mais próximo do valor desejado. Dentre os principais fatores que afetam o desempenho deste instrumento de extrema importância na indústria se destaca o agarramento, consequente de uma alta fricção das partes móveis da válvula, que leva as variáveis de processo a terem ciclos limites.

Visto a quantidade de válvulas de controle presentes na indústria e suas devidas importâncias para a continuidade e qualidade de produção, é preciso detectar o fenômeno, a fim de poder atuar sobre ele e assim reduzir despesas operacionais causadas pelo mau desempenho do instrumento e evitar paradas de manutenção.

Neste trabalho são descritas e comparadas as limitações dos métodos atualmente conhecidos na literatura para detecção do agarramento em válvulas industriais de controle, além de propor três novas técnicas para detecção do evento.

Uma fácil detecção do agarramento, sem intervenção nas variáveis de planta, e utilizando os dados do processo, é necessária, sendo possível tomar ações de modo a compensar o efeito do fenômeno e assim reduzir a variabilidade do sistema.

O presente trabalho é dividido da seguinte maneira: o primeiro item é uma revisão bibliográfica contendo os principais conceitos para o entendimento do agarramento, explicação de modelos que descrevem o fenômeno e métodos de detecção do evento. São descritos no capítulo de materiais e métodos as três propostas para detecção de agarramento. Uma análise crítica das técnicas de detecção atuais e uma análise dos métodos propostos estão agrupadas no capítulo de resultados. Ao fim, as conclusões quanto aos desempenhos observados e sugestões para futuros trabalhos são apresentadas.

2 Revisão Bibliográfica

Oscilações em malhas de controle têm como consequência um aumento da variabilidade das variáveis de processo, podendo alterar a qualidade do produto final, além de aumentar custos energéticos e reduzir a lucratividade. Podem ser decorrentes de distúrbios externos, controladores mal ajustados ou não-linearidades em válvulas de controle (agarramento, zonas mortas). Pesquisas (Desborough e Miller, 2002; Paulonis e Cox, 2003) apontam que este último é responsável por 20 a 30% das oscilações em malhas de controle.

Dentre as não-linearidades, o agarramento é um dos maiores problemas de processo da indústria, gerando ciclos limites.

Um breve fluxograma contendo as principais variáveis de uma malha de controle em *feedback* está representado na Figura 2.1, onde:

SP: setpont;

OP: output do controlador;

MV: variável manipulada (posição da haste da válvula);

PV: variável de processo.

e(t): erro, ou diferença entre SP e PV, no instante de tempo *t*.

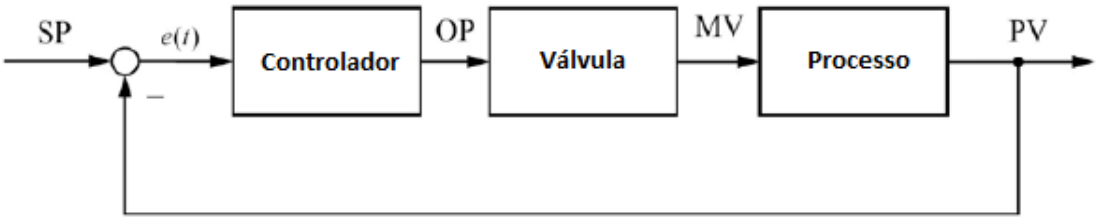

Figura 2.1: Fluxograma de uma malha *feedback* com suas principais variáveis.

2.1 Definição de Agarramento

Agarramento é um evento que ocorre em válvulas quando a fricção estática excede a dinâmica, fazendo com que pequenas variações na saída do controlador (OP) não resultem em movimentação da haste do atuador da válvula (MV). Deste modo, ocorre um acúmulo de energia potencial no sistema, que é transformada em energia cinética, na forma de um movimento abrupto da variável manipulada (Choudhury et al., 2008).

O agarramento é definido por Choudhury et al. (2008) como "a propriedade de um elemento que o seu movimento suave, em resposta a uma entrada variável, é precedida por uma parte estática (zona morta + banda de agarramento), seguido por um súbito salto chamado '*slip-jump*'. *Slip-Jump* é expresso em percentagem do output, e possui origem no sistema mecânico, quando a fricção estática excede a fricção dinâmica".

O fenômeno do agarramento pode ser descrito também através de um gráfico input-output (OP-MV) de uma válvula, conforme a Figura 2.2.

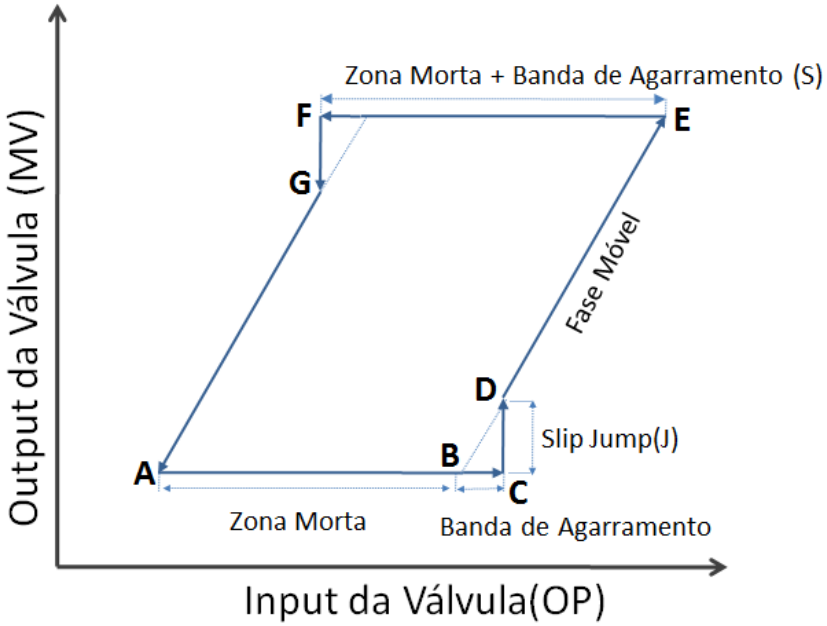

Figura 2.2: Típico diagrama Input-Output de uma válvula com agarramento.

Quando a válvula entra em repouso ou muda a sua direção (ponto A), a válvula fica estagnada devido à fricção estática. Assim que o controlador supera a zona morta (AB) e a banda de agarramento (BC), a haste "pula" para a posição D, e então continua a se mover ao longo da fase móvel (DE), até que seja necessário alterar o sentido de atuação da válvula (E), onde ocorre o agarramento novamente.

Na prática, MV geralmente não é conhecido, exceto quando usadas válvulas ditas “inteligentes”. Em malhas de vazão, porém, pode ser aproximado por PV. Assim, busca-se o uso de gráficos PV-OP para a detecção do agarramento. Entretanto, devido à dinâmica do processo, o comportamento padrão descrito na Figura 2.2 não pode ser visualizado.

2.2 Modelos de Agarramento

2.2.1 Modelos Físicos

Este tipo de modelo descreve o agarramento a partir de balanços de força na válvula.

Choudhury et al. (2005) e Kayihan & Doyle (2000) demonstraram o balanço de força para um atuador pneumático, comumente utilizado na indústria de processos, de modo que o sinal de entrada na válvula é convertido em sinal de pressão, e este em posição do atuador (output):

$$m \times \ddot{x} = F_{pressure} - F_{spring} - F_{friction} - F_{fluid} - F_{seat}. \tag{2.1}$$

Onde m é a massa das partes móveis da válvula; x é a posição da haste; $\ddot{x}$ é a aceleração da haste; $F_{pressure}$ é a força aplicada pelo atuador, descrita como $F_{pressure} = Sa * P$, onde Sa é a área do diafragma e P a pressão do ar; F_{spring} é a força da mola, sendo F_{spring}

$= k * x$, e k a constante da mola; $F_{friction}$ é a força de fricção; F_{fluid} é a força devido a queda de pressão através da válvula, definida por $F_{fluid} = \alpha * \Delta P$, com α a área desbalanceada do plug e ΔP a queda de pressão; e F_{seat} sendo a força extra necessária para a válvula se assentar.

Como explicado por Choudhury et al. (2005) e Kayihan & Doyle (2000), F_{fluid} pode ser negligenciada devido a sua baixa ordem de grandeza comparada com F_{spring} e $F_{friction}$, e F_{seat} pode ser desconsiderada por simplicidade. A descrição de $F_{friction}$ é dada em diversos modelos por Olsson (1996) e Karnopp (1985).

Porém, mesmo com estas simplificações, o modelo exige diversos parâmetros específicos de cada válvula. A obtenção e inserção de tais dados para cada uma das válvulas em uma indústria contendo diversas válvulas é considerada inviável, visto que muitos são desconhecidos, pois dependem da sua condição atual.

2.2.2 Modelos baseados em dados de planta

Buscando descrever o agarramento de forma mais simples, foram criados modelos baseados na observação do comportamento imposto pelo agarramento à planta (PV, OP e MV). Neste trabalho serão descritos três destes modelos:

- Stenman et al. (2003)
- Kano et al. (2004)
- He et al. (2007)

2.2.2.1 Modelo de Stenman

Stenman et al. (2003) descreve o agarramento utilizando apenas um parâmetro (*d*). A válvula só se moverá quando a diferença entre a posição atual e a posição enviada pelo controlador superar o parâmetro "*d*". O comportamento do atuador é dado por:

$$x(t) = \begin{cases} x(t-1) & Se\ |u(t) - x(t-1)| \leq d, \\ u(t) & do\ contrário. \end{cases} \tag{2.2}$$

Sendo *x(t)* a posição atual da haste; *x(t-1)* a posição anterior da haste; *u(t)* o output do controlador; *d* a banda de agarramento.

2.2.2.2 Modelo de Kano

Choudhury et al. (2004) descreve o fenômeno do agarramento utilizando dois parâmetros *S* e *J*, sendo *S* a soma da Banda de Agarramento e a Zona Morta, e *J* a slipjump. Seu modelo foi aperfeiçoado por Kano et al. (2004), permitindo o uso de sinais estocásticos. O algoritmo que descreve seu funcionamento está demonstrado na Figura 2.3.

O modelo distingue dois estados distintos: fase de movimento (*stp* = 0) e fase parada (*stp* = 1). Além disso, define como "u_s" o output do controlador no momento em que a válvula entra na fase parada.

De início, é realizada a checagem dos limites superiores e inferiores do output do controlador. O parâmetro "u_s" é atualizado somente quando há mudança na direção de atuação do controlador (i.e. $\Delta u(t)\Delta u(t-1) \leq 0$) e quando se encontrava na condição de movimento.

A seguir, caso a válvula não esteja na fase de movimento, é verificado se a ocorre mudança na direção e superou a fricção estática máxima. Os valores de "*d*" (+1 ou -1) denotam a direção da força de fricção. A segunda condição julga se a válvula estava seguindo na mesma direção e superou a fricção estática máxima. Caso alguma dessas duas condições for satisfeita, a válvula entrará na fase de movimento e a posição da válvula *y(t)* é atualizada. Caso contrário, a haste da válvula permanece imóvel.

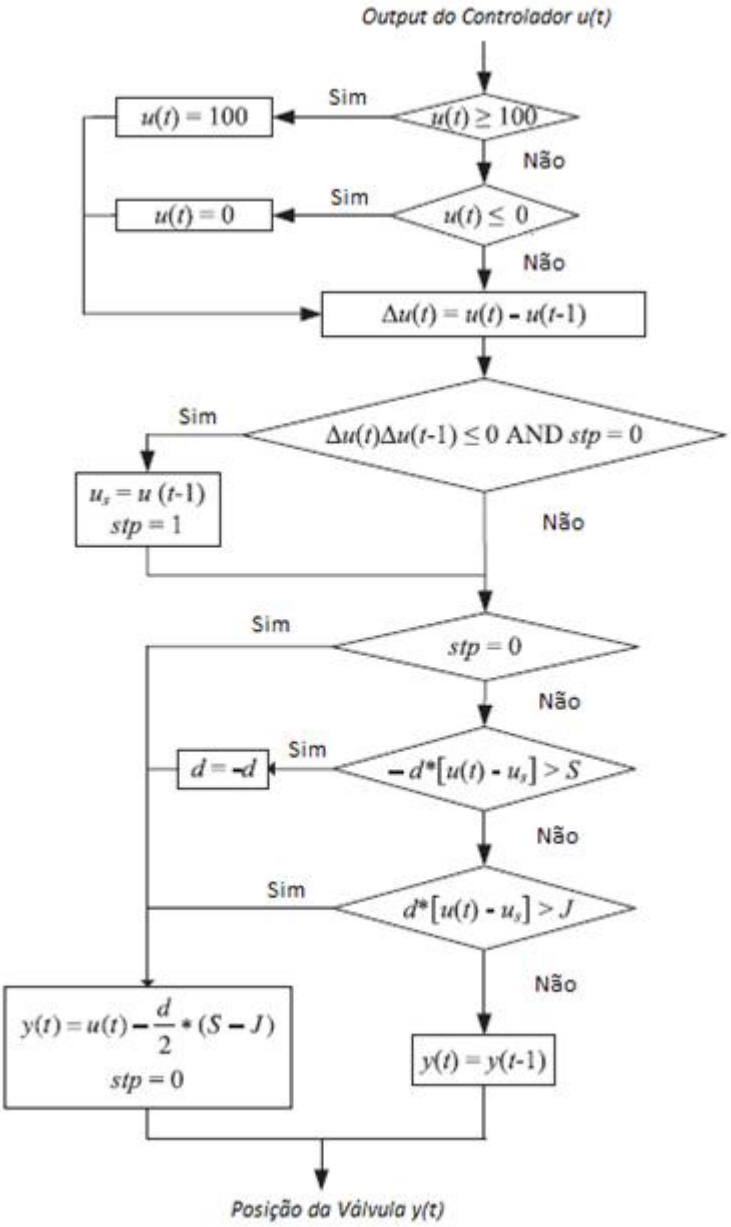

Figura 2.3: Fluxograma descrevendo o modelo proposto por Kano et al. (2004) (Adaptado de Kano et al., 2004).

2.2.2.3 Modelo de He

He et al. (2007) descreve um modelo simples para o agarramento, utilizando dois parâmetros f_d (fricção estática) e f_s (fricção dinâmica). O fluxograma contendo o detalhamento do modelo está apresentado na Figura 2.4.

Os parâmetros são semelhantes aos empregados por Kano et al.(2007), tendo a seguinte equivalência: $J = f_s - f_d$; $S = f_s + f_d$. A variável "u_r" é a força residual atuando sobre a válvula que não ocasiona movimento; u_v é a posição da válvula; e *cum_u* é uma variável temporária que representa a força total atuando sobre a válvula. Se esta é superior à fricção estática (f_s), ocorre o movimento da posição da válvula $u_v(t)$ para $u(t)$, deslocada pela fricção dinâmica (f_d). Caso contrário, a válvula não se move, e a força cumulativa (*cum_u*) será a força residual (u_r).

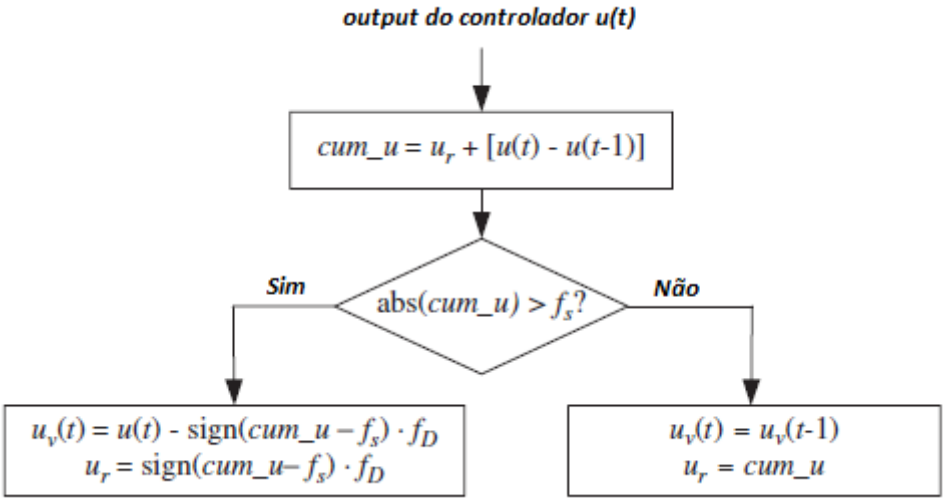

Figura 2.4: Fluxograma descrevendo o modelo proposto por He et al. (2007)

2.3 Métodos de detecção de Agarramento

2.3.1 Yamashita (2006)

Para detectar o fenômeno de agarramento, Yamashita (2006) propõe a análise de padrões no gráfico MV-OP. Para isso é utilizada uma combinação de três símbolos para descrever o comportamento das variáveis MV e OP ao longo do tempo: *I* (*increasing*, ou crescente), *S* (*steady*, ou invariável) e *D* (*descreasing*, ou decrescente). Esses estão demonstrados na Figura 2.5.

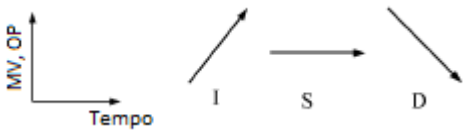

Figura 2.5: Representações simbólicas de comportamentos nas séries MV e OP: crescente (I), invariável (*S*) e decrescente (*D*).

Esses três comportamentos são facilmente obtidos a partir do seguinte procedimento:

1. Calcular a derivada (x) dos pontos dos sinais OP e MV através do método de diferenças finitas;

2. Normalizar as derivadas (*x*) utilizando média (μ) e o desvio padrão (σ);

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{2.3}$$

3. Quantificar os eventos de *I, S* e *D* da seguinte forma:

   a. Z > 1, crescente (*I*);

   b. Z < -1, decrescente (*D*);

   c. -1 ≤ Z ≤ 1, invariável (*S*).

Combinando a simbologia para as séries OP e MV, de modo que o primeiro parâmetro é destinado a caracterizar o comportamento do output do controlador e o segundo a posição da haste, estão agrupados na Tabela 2.1 os possíveis eventos. Por exemplo, se OP está em declínio com o tempo (D), e MV está praticamente inalterável (S), a simbologia adequada é DS. Os padrões IS e DS caracterizam o fenômeno do agarramento, visto que o output sofre variação (crescimento ou declínio), porém sem alterar a variável manipulada.

Tabela 2.1: Representação de comportamentos dos sinais OP e MV.

OP /MV	*D*	*S*	*I*
I	ID	IS	II
S	SD	SS	SI
D	DD	DS	DI

Yamashita (2006) propôs a utilização de três índices para caracterizar o agarramento. O primeiro, ρ_1, conta o tempo total em que foram mantidos os padrões *IS* e *DS* no diagrama MV-OP.

$$\rho_1 = \frac{\tau_{IS} + \tau_{DS}}{\tau_{total} - \tau_{SS}} \tag{2.4}$$

Onde τ_{IS} e τ_{DS} representam o período em que ocorreram os comportamentos *IS* e *DS*, respectivamente. O denominador corresponde ao total de tempo de coleta, excluindo os períodos em que não ocorreu nem variação de MV nem de OP. Quanto mais próximo da unidade for ρ_1, maior o agarramento. Para sinais aleatórios, este parâmetro tende a corresponder ao valor de 0,25, visto que representa 2/8 do total de padrões, excluindo *SS*.

Uma sequência de padrões pode ser concatenada em um único símbolo. Por exemplo, *DS* seguido de um *DD* é transformado em *DS-DD*. Deste modo foi possível a criação de um segundo parâmetro por Yamashita (2006), ρ_2, que contabiliza os movimentos característicos de agarramento, em que IS e DS estão incorporados: *IS-II, DS-DD, IS-SI* e *DS-SD*. Estes quarto comportamentos característicos estão demonstrados na Figura 2.6.

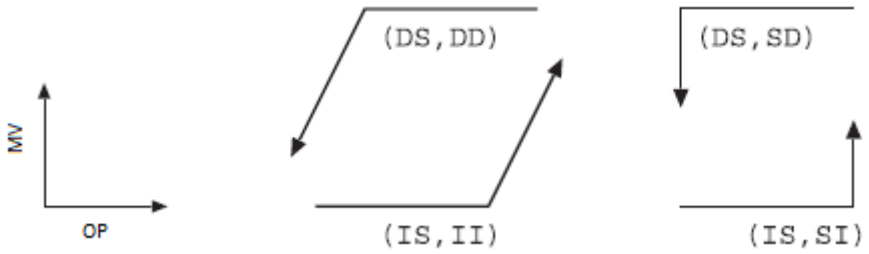

Figura 2.6: Ilustração quantitativa para comportamentos típicos de agarramento nos diagramas MV-OP (Yamashita 2006).

$$\rho_2 = \frac{\tau_{IS\ II} + \tau_{DS\ SI} + \tau_{DS\ DD} + \tau_{DS\ SD}}{\tau_{total} - \tau_{SS}} \tag{2.5}$$

Os símbolos $\tau_{IS\ II}$, $\tau_{DS\ SI}$, $\tau_{DS\ DD}$ e $\tau_{DS\ SD}$ correspondem ao número de amostras em que ocorre os comportamentos de agarramento. Esse parâmetro possui mesmo critério que ρ_1 para detecção de agarramento: valor superior a 0,25.

Por último, um terceiro parâmetro foi criado, ρ_3, que exclui de ρ_1 padrões que contém *IS* e *DS*, mas não correspondem aos comportamentos comuns de agarramento mostrados na Figura 2.6. Por exemplo, no caso de uma sequência "*IS IS IS DD IS IS II*", o parâmetro excluirá de ρ_1 3/7 do período, visto que os três primeiros *IS* são seguidos por *DD*, o que não caracteriza o agarramento, segundo os padrões informados pela Figura 2.6.

$$\begin{aligned}\rho_3 = \rho_1 - (&\tau_{IS\ DD} + \tau_{IS\ DI} + \tau_{IS\ SD} + \tau_{IS\ ID} + \tau_{IS\ DS} + \tau_{DS\ DI} \\ &+ \tau_{DS\ SI} + \tau_{DS\ ID} + \tau_{DS\ II} + \tau_{DS\ IS})/(\tau_{total} - \tau_{SS}).\end{aligned} \tag{2.6}$$

2.3.2 Correlação Cruzada de Horch (1999)

Um método simples para detecção de agarramento é proposto por Horch (1999) partindo das seguintes premissas:

- O processo não é integrador, ou seja, não possui polo na origem.
- É utilizado um controlador PI;
- A oscilação em ciclo foi detectada possuindo grande amplitude;
- Caso a função de correlação cruzada $\varphi_{uy}(\tau)$ entre o output do controlador (*u*) e o output do processo (*y*) for uma função ímpar, a causa da oscilação é provável de ser o agarramento;
- Se a função de correlação cruzada $\varphi_{uy}(\tau)$ for uma função par, simétrica em relação ao eixo *y*, a oscilação deve ter origem em distúrbios externos ou ajuste agressivo do controlador.

A distinção entre os dois comportamentos pode ser observada na Figura 2.7. Nos gráficos inferiores, está exemplificada a função de correlação cruzada entre output do controlador *u(t)* e variável de processo *y(t)*. Acima, típicos gráficos de *u(t)* (linha grossa) e *y(t)* (linha traço-ponto) ao longo do tempo. À esquerda, o caso em que ocorre agarramento e a função $\varphi_{uy}(\tau)$ é impar , e à direita quando a função $\varphi_{uy}(\tau)$ é par, quando a oscilação é consequência de distúrbios externos ou ajuste agressivo do controlador.

A função de correlação cruzada (CCF) é definida como:

$$\varphi_{uy}(\tau) = \sum_{k=0}^{N-|\tau|-1} u(k)y(k+\tau) \tag{2.7}$$

Onde $\varphi_{uy}(\tau)$ é a função de correlação cruzada, u é o output do controlador (ou OP), y é a variável de processo (ou PV), N é o número pontos utilizados para análise na série de dados e τ é o "*lag*", ou atraso.

Para distinção automática do comportamento da CCF, são utilizados os seguintes parâmetros:

$$\Delta\tau = \frac{|\tau_1 - \tau_r|}{|\tau_1 + \tau_r|} \tag{2.8}$$

$$\Delta\rho = \frac{|\Phi_0 - \Phi_{\max}|}{|\Phi_0 + \Phi_{\max}|}, \tag{2.9}$$

Onde τ_r é o zero positivo da CCF; $-\tau_1$ é o zero negativo da CCF; φ_0 é o valor da função quando o *lag* é zero, também podendo ser expresso como $\varphi_{uy}(0)$; e φmax é o maior valor de CCF entre τ_r e $-\tau_1$. Estas variáveis são exemplificadas na Figura 2.8, para facilitação do entendimento.

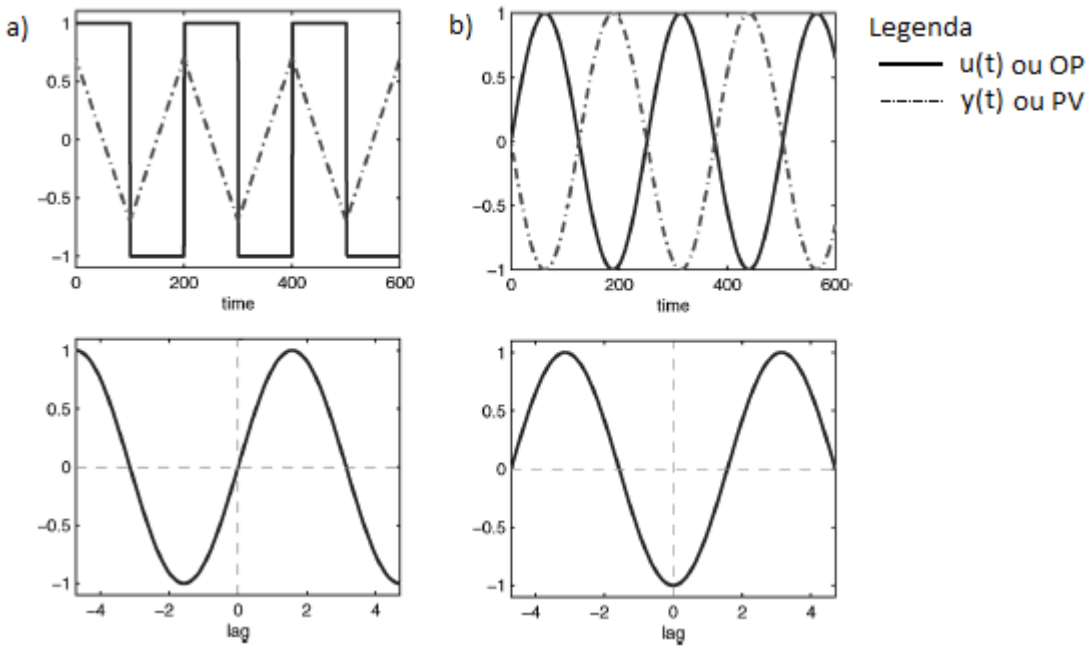

Figura 2.7: Típicos gráficos de *u(t)* e *y(t)* em função de tempo, e funções de correlação cruzada no caso com (a) e sem agarramento (b) (adaptado de Horch, 1999).

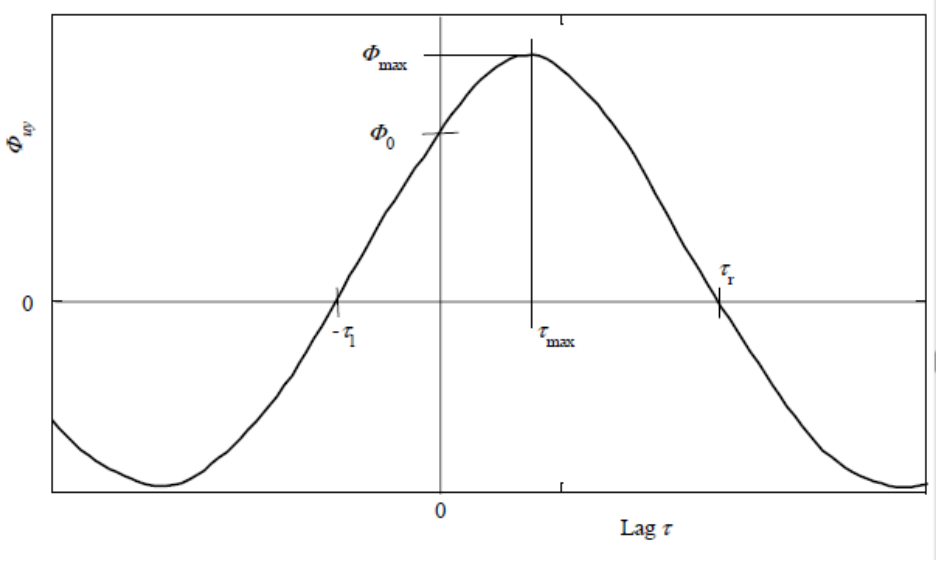

Figura 2.8: Definições das principais variáveis da CCF (Horch 1999).

Os critérios para distinção entre uma CCF par ou ímpar são os seguintes:

$$\left.\begin{array}{l} 0.0 < \Delta\rho \leq \dfrac{2-\sqrt{3}}{2+\sqrt{3}} \approx 0.072 \\ 0.0 < \Delta\tau \leq \dfrac{1}{3} \end{array}\right\} \Rightarrow \text{CCF par: sem agarramento}$$

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{2-\sqrt{3}}{2+\sqrt{3}} \approx 0.072 < \Delta\rho < \dfrac{1}{3} \\ \dfrac{1}{3} < \Delta\tau < \dfrac{2}{3} \end{array}\right\} \Rightarrow \text{Sem decisão}$$

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{1}{3} \leq \Delta\rho \leq 1.0 \\ \dfrac{2}{3} \leq \Delta\tau \leq 1.0 \end{array}\right\} \Rightarrow \text{CCF ímpar: com agarramento}$$

2.3.3 Diagnóstico baseado em ajuste de curva

A partir de observações do comportamento de OP com o tempo, He et al. (2007) propõe um método de detecção de agarramento a partir de ajuste de curvas na variável OP. Quando há agarramento, OP possui característica triangular, conforme Tabela 2.2. Na proposta de He et al. (2007), é sugerida a análise da PV quando o processo é integrador, visto que este se comporta de forma triangular também quando sofrendo de agarramento. Quando a oscilação é causada por distúrbios externos ou mau ajuste do controlador, seu comportamento tende a ser senoidal.

Caso o ajuste da série de dados com uma função triangular possuir menor erro que com uma função senoidal adequada, o sistema então tem característica mais próxima de agarramento.

Tabela 2.2: Típicos padrões de agarramento em variáveis em função do tempo, para diferentes processos (Srinivasan & Rengaswamy, 2005).

Medida	*Processos rápidos (Vazão)*		*Processos lentos (Pressão e Temperatura)*	*Processos com ação integral (Nível)*	*Nível com controlador PI*
	Ação I dominante	Ação P dominante			
OP	Triangular	Retangular	Triangular	Triangular	Triangular
PV	Quadrado	Retangular	Senoidal	Triangular	Parabólico

2.3.3.1 Aproximação Senoidal

Esta aproximação deve ser feita a cada período de oscilação, visto que em um processo real, distúrbios e ruídos estão presentes, alterando assim a magnitude e frequência do sinal. Através de um problema de otimização do tipo mínimos quadrados, os valores para os parâmetros são determinados:

$$J_{\sin} = \min_{A,\omega,\varphi} \| y(t) - A\sin[\omega(t_i : t_{i+1} - t_i) + \varphi] \|_2 , \tag{2.10}$$

Onde *y(t)* é o sinal que será aproximado, *A* a amplitude, *ω* a frequência e *φ* a fase do seno, que pode ser considerada igual a zero visto que a aproximação é por intervalos de meio período. O termo (*ti : ti+1*) é a abrangência da aproximação, conforme Figura 2.9 (a). Para definir os parâmetros, é possível utilizar métodos numéricos iterativos (como as funções do MATLAB *lsqnonlin/lsqcurvefit*). O erro quadrático médio é denominado de MSE_{sin}, sendo a média dos erros quadráticos médios de cada período (*ti:ti+1*).

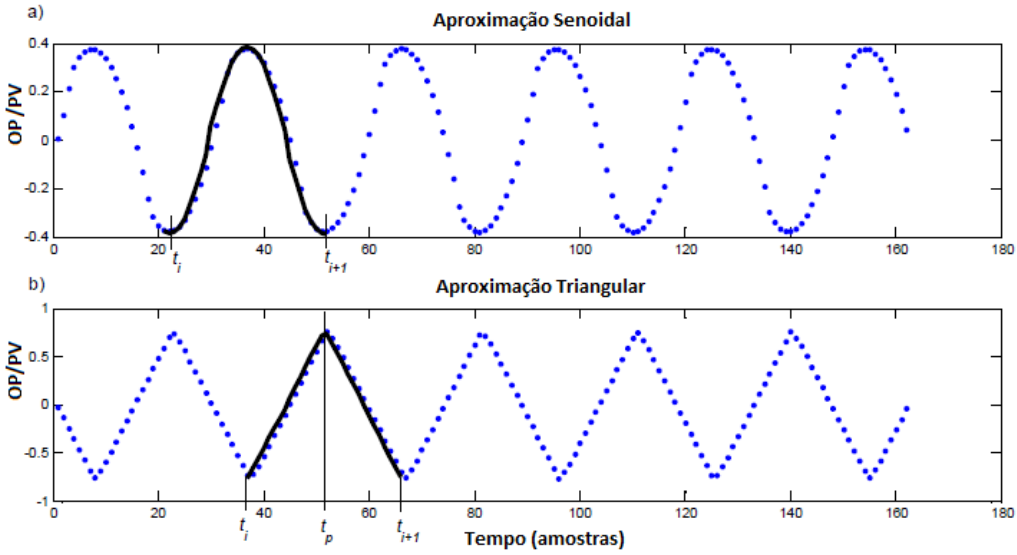

Figura 2.9: (a) Aproximação Senoidal; (b) Aproximação Triangular.

2.3.3.2 Aproximação Triangular

Para realizar esta aproximação, podem ser ajustadas duas retas para cada meio período, através da seguinte função objetivo:

$$J_{tri} = \underbrace{\min}_{a,b} \| y(t) - a\Delta t + b \|_2 . \tag{2.11}$$

Onde Δt é a diferença entre ti e o tempo correspondente à máxima amplitude, t_p, para primeira aproximação, e a diferença entre t_p e t_{i+1} para o segundo ajuste, conforme Figura 2.9 (b). Os termos a e b são os coeficientes angular e linear da reta, respectivamente. Estas aproximações podem ser realizadas a partir da função do MATLAB *polyfit* linear. É denominada MSE_{Tri} a média entre os desvios quadráticos médios das curvas ajustadas.

2.3.3.3 Índice de Agarramento (SI)

Para determinar o agarramento, foi proposto o índice de agarramento (SI):

$$\mathrm{SI} = \frac{\mathrm{MSE_{Sin}}}{\mathrm{MSE_{Sin}} + \mathrm{MSE_{Tri}}} \tag{2.12}$$

Assim, quando a série de dados é perfeitamente ajustada para uma função triangular, MSE_{Tri} = 0, e SI = 1, caso ideal de agarramento. Quando os pontos são igualmente bem ajustados para os dois casos, MSE_{sin} = MSE_{Tri}, o que resulta em um SI = 0.5. Os seguintes intervalos foram heuristicamente propostos pelos autores:

$$\begin{aligned} \mathrm{SI} \leq 0.4 &\Longrightarrow \textbf{Sem Agarramento} \\ 0.4 < \mathrm{SI} < 0.6 &\Longrightarrow \textbf{Indefinido} \\ \mathrm{SI} \geq 0.6 &\Longrightarrow \textbf{Agarramento} \end{aligned} \tag{2.13}$$

2.3.4 Ajuste Elíptico de plot PV-OP, Choudhury et al.(2006)

Para a análise de agarramento proposta por Choudhury et al. (2006), é assumido que, em condições normais, o processo é linear em torno do ponto de operação; e que o sinal se comporta de forma gaussiana. Caso estas duas condições sejam falsas, o agarramento pode ser a causa da não-linearidade e da não-gaussianidade.

Assim, são necessárias certas etapas preliminares antes de realizar a análise proposta por Choudhury et al. (2006) . De início, a não-linearidade é detectada utilizando métodos baseados nos índices NGI (índice de não-gaussianidade) e NLI (índice de não-linearidade). É utilizado então um filtro de Wiener, a partir de um segmento de dados com oscilações regulares, gerando um gráfico PV-OP. Busca-se, a partir deste, a localização de padrões elípticos, que caracterizam o agarramento.

A partir desse método, é possível observar o agarramento aparente, sendo este a distância máxima entre as bordas da elipse, conforme representado na Figura 2.10 pelo segmento PQ.

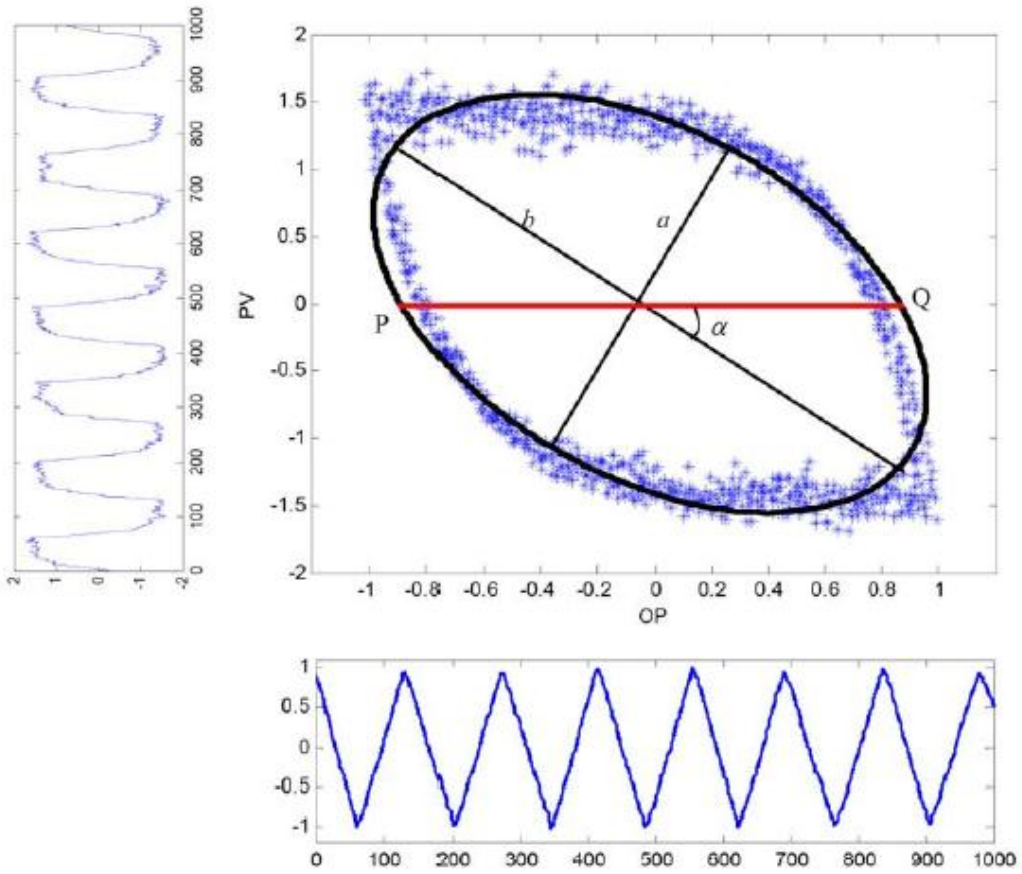

Figura 2.10: Ajuste elíptico em gráfico PV-OP, após etapas preliminares. Em vermelho, o agarramento aparente.

3 Materiais e Métodos

Devido à baixa quantidade de dados reais de planta obtidos em que o fenômeno do agarramento está presente, foi utilizada a ferramenta Simulink do programa MATLAB R2009b para simular o evento desejado.

O modelo de agarramento empregado foi o de Kano et al. (2004), e foram realizados testes para valores dos parâmetros S e J, variando de 0 a 0,6 cada, e amplitude do sinal de ruído, de 0 a 0,1. Foram testados outros modelos, como os de Stenman et al. (2003) e He et al. (2007). A escolha pelo método de Kano foi realizada devido à sua facilidade de implementação e sua consolidação na literatura.

Para simular uma sintonia agressiva do controlador PI, em que esta é responsável pela oscilação em ciclos, os parâmetros S e J são zerados, e é introduzido um distúrbio senoidal. A Figura 3.1 representa o ambiente do Simulink utilizado na simulação de dados.

O degrau realizado na entrada do sistema é de duas unidades; o controlador PID é descrito pela expressão "*P + I/s + Ds*", onde *P*, *I* e *D* são os termos proporcional, integral e derivativos, sendo usados os valores de 3, 0,3 e 0, respectivamente. O sistema é caracterizado pela função de transferência expressa pela equação 3.1. Os distúrbios têm seus parâmetros variáveis, conforme o teste realizado.

$$PF = \frac{0{,}5}{30s+1} \tag{3.1}$$

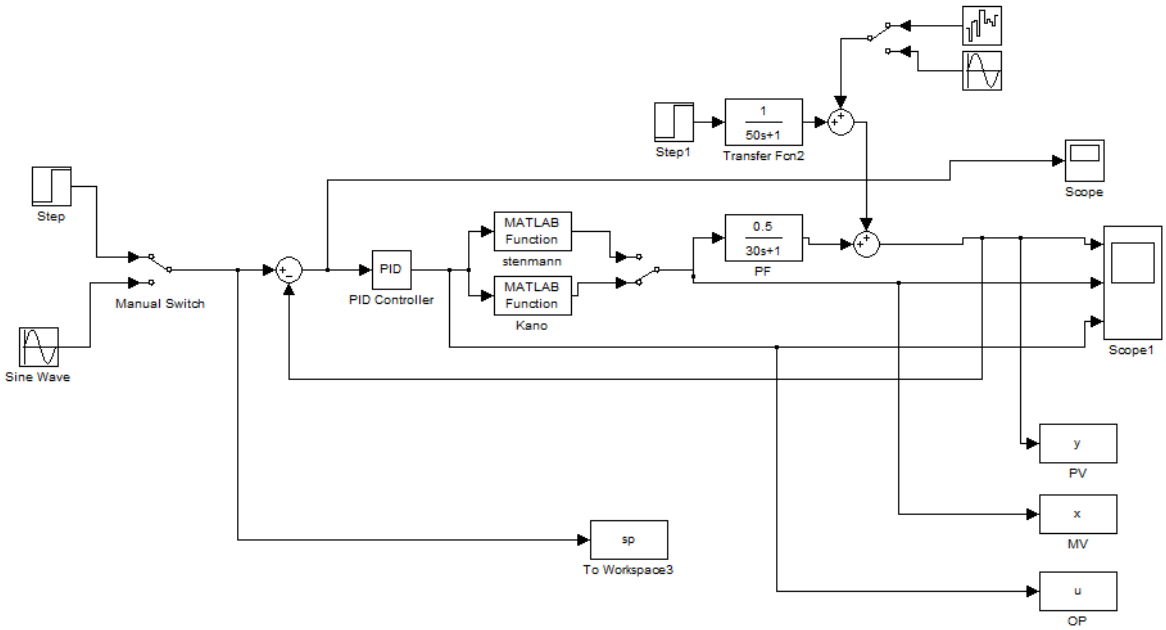

Figura 3.1: Ambiente de Simulink no MATLAB, utilizado para simulação de dados de agarramento.

3.1 Primeiro Método Proposto: Inclinação da curva MV-OP

Este método é baseado no diagrama padrão MV-OP de um sistema sofrendo agarramento, conforme Figura 2.2. Ele visa encontrar padrões em que a inclinação da curva seja muito baixa, baseada na definição do fenômeno: *"...pequenas variações do output do controlador (OP) não resultem em movimentação da haste do atuador da válvula (MV)"*.

Visto que quando o agarramento não está presente, o gráfico tende a se tornar uma reta y = x ou y = -x, qualquer inclinação abaixo de 45° demonstraria um desvio da normalidade. Porém, a sugestão é pela busca dos padrões horizontais no diagrama MV-OP, que caracteriza melhor o evento, semelhante ao primeiro índice de Yamashita, que contabiliza os padrões *IS* e *DS*, como descrito anteriormente.

Uma diferença do método proposto para o de Yamashita, é que a técnica já existente utiliza a derivada dos dados ao longo do tempo para descrever seu comportamento, enquanto o método proposto realiza uma análise diretamente no diagrama MV-OP.

Assim, para sua implementação, foi considerado que quando o módulo da inclinação da curva MV-OP for inferior a 0,15, é considerado que a variação do output não resultou em alteração da posição da haste da válvula, caracterizando o agarramento.

O parâmetro proposto para análise é a razão entre o número de pontos em que esta inclinação foi observada ($\tau_{0,15}$), pelo total de dados coletados (τ_{total}).

$$M1 = \frac{\tau_{0,15}}{\tau_{total}} \tag{3.2}$$

Durante a simulação foi removido o período transiente resultante da aplicação de um degrau, analisando assim apenas o ciclo limite característico.

3.2 Segundo Método Proposto: Cálculo do agarramento aparente

Baseado no método da aproximação do gráfico PV-OP por uma elipse, foi sugerida uma nova proposta para cálculo do agarramento aparente, sem a necessidade de realizar o ajuste em forma de elipse. É uma proposta semelhante ao método de "c-means clustering", descrita por Choudhury et al. (2006), porém de forma mais simples e sem o objetivo de quantificar o agarramento, apenas a detecção.

O procedimento realizado foi o seguinte:

1. Normalizar OP de modo que este varie de 0 a 1 na amostragem;

   OP_Normalizado = (OP - min(OP)) ./ (max(OP)-min(OP))

2. Calcular média (μ) e desvio padrão (σ) para a PV, no mesmo período de coleta de OP;

3. Definir:

   a. Limite Superior = μ +σ/5;

   b. Limite Inferior = μ - σ/5.

4. Verificar a diferença entre o valor máximo e mínimo de OP dentre os limites superior e inferior de PV.

Visto que a maior distância entre as bordas da elipse geralmente se encontra próxima do valor médio de PV, conforme Figura 3.2, busca-se então entre os limites superior e inferior propostos, o maior e menor valor de OP, para cálculo do agarramento aparente. Assim, quanto mais próximo o valor da unidade, maior o agarramento.

Pode ser feita uma condição de modo que o parâmetro é apenas calculado quando há uma variação relevante de PV, já que sem agarramento e má sintonia do controlador, o gráfico pode acabar se tornando apenas um ponto, sendo invariantes, na teoria, PV e OP com o tempo. Porém, esta etapa é desnecessária se realizados os mesmos procedimentos preliminares propostos por Choudhury et al. (2006).

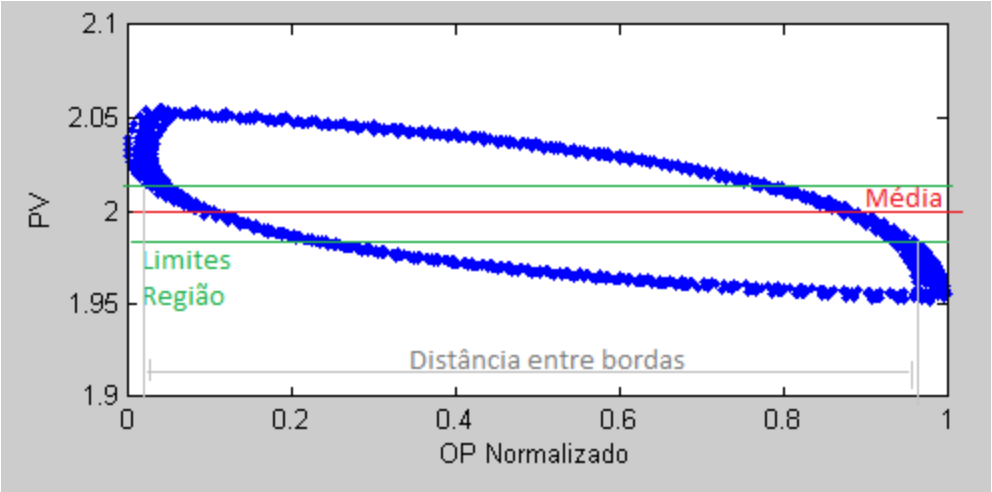

Figura 3.2: Gráfico PV-OP normalizado contendo as informações necessárias para cálculo proposto de agarramento aparente.

3.3 Terceiro Método Proposto: Faixas de derivada de OP

Analisando a Figura 3.3, onde se encontra a OP e a sua derivada em função do tempo para um caso industrial, notou-se que as derivadas se encontravam em faixas, localizadas às margens da média. Sabendo-se que quando há mau ajuste do controlador, o sinal OP tente a se comportar de forma senoidal, e que a derivada deste é o padrão cossenoide, buscou-se a distinção dos comportamentos com e sem agarramento analisando a distribuição da derivada em faixas.

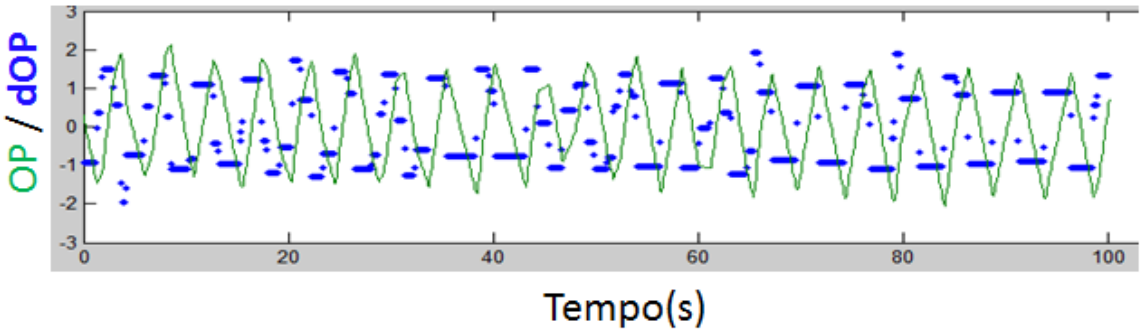

Figura 3.3: Comportamento de OP (verde) e sua derivada (azul) em função do tempo para caso industrial.

Caso for detectado que as derivadas de OP se concentram afastadas da média, e não bem distribuídas, como acontece no comportamento cossenoide, o fenômeno de agarramento pode ser considerado presente no sistema.

O procedimento é descrito da seguinte forma:

1. Cálculo da derivada de OP para cada ponto, seguindo o método das diferenças finitas:

$$dOP(i) = \frac{OP(i+1) - OP(i)}{dt} \tag{3.3}$$

Onde *dOP* é a derivada de OP do ponto *i*, *i+1* é o ponto seguinte na série de dados, e *dt* é o tempo entre cada amostragem;

2. Normalizar a derivada de OP em função de sua média e desvio padrão;

3. Definir o tamanho de cada faixa igual à variação máxima de dOP normalizado, dividido por 6, para que se criem assim 6 faixas.

4. Determinar abrangência das faixas:

    a. Limite Inferior = N*(tamanho da banda); para N variando de -3 a 2;

    b. Limite Superior = M*(tamanho da banda); para M variando de -2 a 3.

5. Contabilizar o número de pontos em cada faixa, e fazer a razão pelo total de pontos disponíveis na coleta de dados.

4 Resultados

4.1 Crítica aos métodos atuais

Esta sessão é direcionada para a análise das características positivas e negativas dos métodos já existentes para detecção de agarramento.

4.1.1 Yamashita

A proposta de Yamashita possui de início um ponto negativo: o uso da variável MV. A posição da haste do atuador de uma válvula não é conhecida na maioria dos casos industriais. Deste modo, acaba tendo pouco uso prático.

Além disso, é sabido que o primeiro parâmetro ρ_1 possui geralmente valores elevados. Foi então realizada uma análise de dados de planta. Neste, buscou-se observar o comportamento da derivada primeira do output, visto que esta determina a nomenclatura dos índices de Yamashita.

Conforme a Figura 4.1, é possível observar que grande parte dos pontos em que o comportamento de OP é crescente ou decrescente, o método de Yamashita considera-os como invariáveis (S), pois estão localizados entre os limites de 1σ e -1σ. De fato, 53% dos pontos coletados de OP foram caracterizados como *S*.

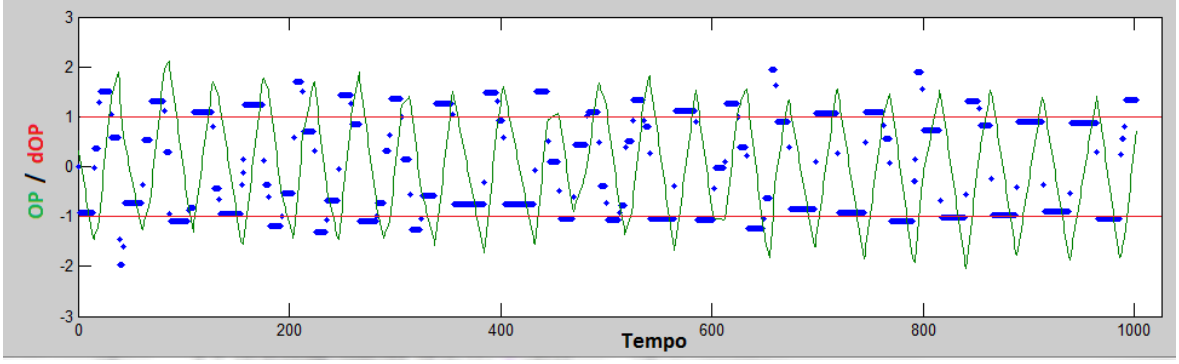

Figura 4.1: Exemplo industrial de válvula sofrendo agarramento. Em verde está representado o OP normalizado, em azul a derivada de OP (*dOP*) e em vermelho, os desvios padrões de dOP.

O mesmo problema ocorre com a análise da MV. Pontos em que o comportamento desta é de ascensão ou declínio são erroneamente caracterizados como invariáveis. Deste modo, pode-se concluir que uma das causas do mau desempenho do primeiro parâmetro de Yamashita é na definição dos padrões.

Note que se a definição dos limites para o padrão S fosse entre $\sigma/2$ e $-\sigma/2$, o caso da Figura 4 1 possuiria apenas 10% de pontos de OP considerados invariantes.

Além disso, é conhecido que o desempenho do método cai com a introdução de ruído, visto que é utilizada a derivada primeira dos sinais para caracterização dos comportamentos. Assim, métodos de suavização prévios são requeridos, introduzindo mais um ponto de análise do usuário.

O método também não abrange padrões quando o ganho do controlador é negativo (Figura 4.2), sendo necessária a alteração dos parâmetros do modelo, de forma a abranger este tipo de evento.

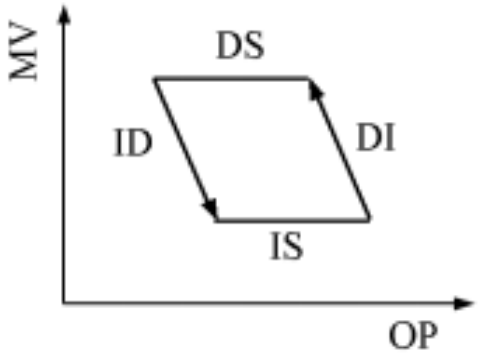

Figura 4.2: Típico padrão MV-OP de agarramento quando o ganho do controlador é negativo.

Manum e Scali (2006) realizaram um trabalho de comparação do método de Yamashita para detecção do fenômeno de agarramento com um sistema, chamado de Plant Check-Up (ou PCU), que utiliza os métodos de correlação cruzada, bi-coerência e técnica de Relay. Do total de 167 sistemas observados, o método de Yamashita caracterizou 32 deles como agarrando, comparado com 55 do PCU. Vinte e quatro eventos foram igualmente caracterizados com agarramento pelos dois sistemas, conforme Figura 4.3.

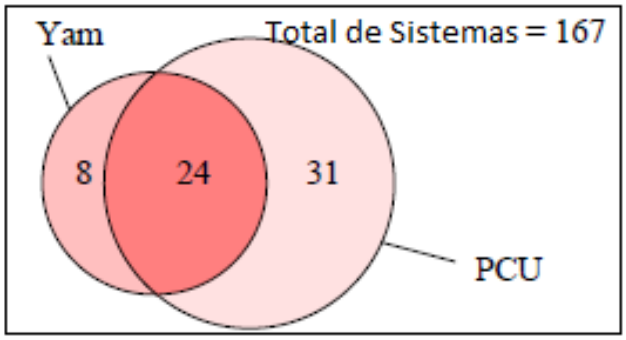

Figura 4.3: Sistemas caracterizados com agarramento por Yamashita (Yam) e PCU (Manum 2006).

Dentre os oito eventos não detectados por PCU, foi reportado que sete destes não possuíam frequência dominante, variável necessária para a técnica de Relay. Foi realizado um segundo teste, utilizando o método da bi-coerência, que caracterizou estes sete loops com o fenômeno do agarramento.

Assim, Manum e Scali (2006) concluíram que o método de Yamashita é capaz de detectar apenas 50% dos eventos que caracterizados por PCU com agarramento.

4.1.2 Método da Correlação Cruzada

Devido às condições do método proposto por Horch (1999), sabe-se que uma de suas limitações é que este na teoria só funciona quando não há ação integral do processo. Deste modo, sistemas de nível não podem ser analisados pelo método da Correlação

Cruzada.

Além disso, He et al. (2007) relata que o método tem seu resultado alterado conforme a configuração dos parâmetros do controlador, conforme Figura 4.4, mostrando assim ser inconsistente.

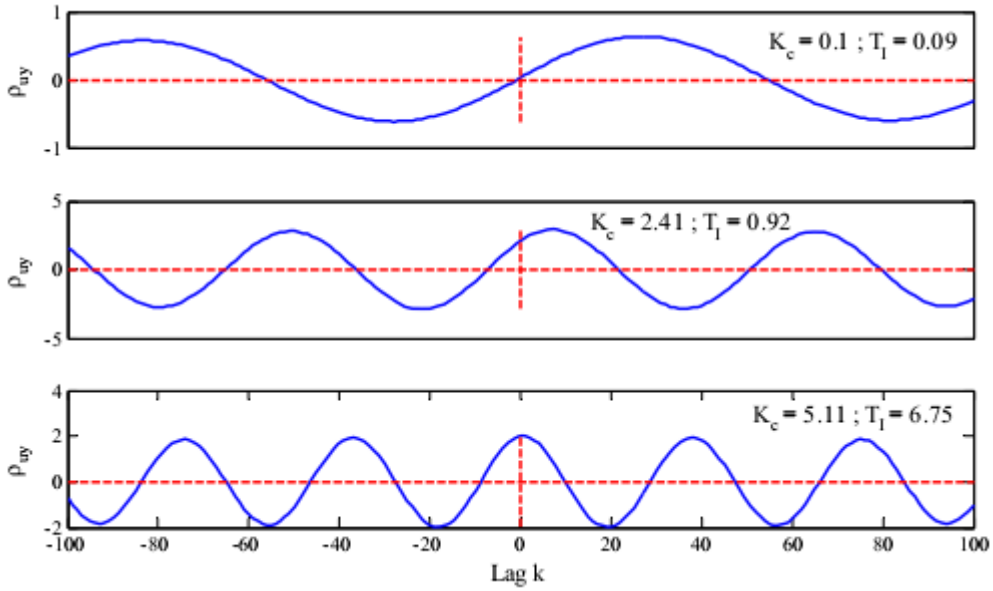

Figura 4.4: Função de correlação cruzada inicialmente ímpar e, após alteração dos parâmetros do controlador Kc e Ti, se tornando par.

4.1.3 Método de ajuste por curva senoidal ou triangular

Este método necessita que o usuário saiba se o processo é regulatório ou integral, de modo a escolher a variável a ser ajustada. Existem casos em que nenhuma das duas possui um erro baixo, como o exemplo da , cujos dados foram obtidos a partir de uma simulação no MATLAB, com parâmetros de agarramento S=0.5 e J=0.3, em um processo regulatório sem ruído.

Além disso, distúrbios são considerados pelo método como senoidais, o que é válido na maioria dos casos, quando o distúrbio está afastado da válvula.

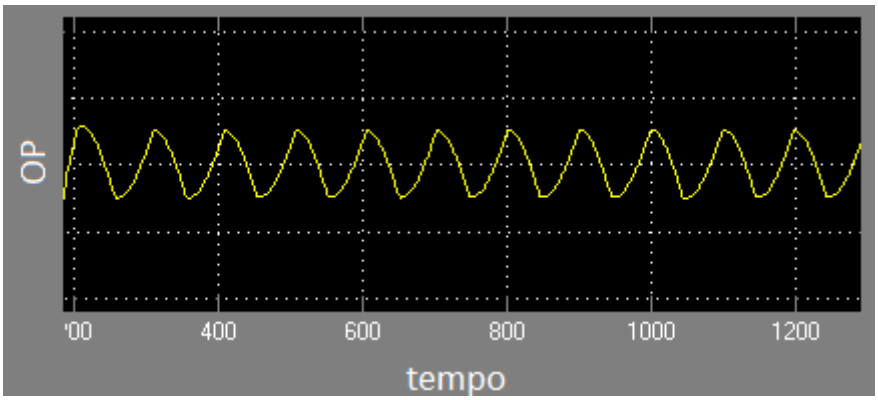

Figura 4.5: Resultado de simulação de agarramento no MATLAB, com parâmetros S=0.5 e J=0.3, onde a curva de OP não possui padrão nem triangular nem senoidal.

4.1.4 Método por ajuste de elipse

Uma limitação deste método é a necessidade de diversos passos anteriores antes da análise de dados. Necessita de cálculo de NGI e NLI, implementação de um filtro de Wiener, e uma boa escolha de segmento de dados. Também, é sabido que o algoritmo tende a produzir uma elipse para casos em que não há uma distinção clara de sua forma.

4.2 Resultados de métodos propostos

4.2.1 Primeiro Método Proposto

Visto que o método proposto é semelhante ao primeiro parâmetro de Yamashita, uma comparação entre o desempenho entre as duas técnicas se torna pertinente. Tal método se baseia na contagem de sequências em que a inclinação do gráfico MV-OP é pequena, inferior a 0,15 em módulo.

Foram realizadas então simulações no MATLAB, de modo a variar a amplitude do ruído e a magnitude dos parâmetros S e J de agarramento. A Tabela 4.1 representa a compilação de dados obtidos.

Tabela 4.1: Compilação de dados obtidos para simulações, variando a amplitude do ruído, e parâmetros de agarramento. À esquerda, resultados obtidos para o método proposto. À direita, primeiro parâmetro de Yamashita.

MÉTODO 1

Ruído = 0

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
0,1	0,82	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
0,2	0,83	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
0,3	0,83	0,92	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
0,4	0,81	0,91	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
0,5	0,87	0,88	0,93	0,96	0,98	0,97	0,97
0,6	0,81	0,92	0,94	0,94	0,97	0,96	0,97

Ruído = 0,0001

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,85	0,94	0,93	0,94	0,95	0,95
0,1	0,00	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
0,2	0,00	0,93	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
0,3	0,00	0,85	0,99	0,97	0,98	0,98	0,98
0,4	0,00	0,90	0,93	0,96	0,97	0,99	0,99
0,5	0,00	0,79	0,92	0,99	0,96	0,97	0,98
0,6	0,00	0,93	0,92	0,94	0,95	0,97	0,97

YAMASHITA

Ruído = 0

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,12	0,81	0,85	0,86	0,86	0,86	0,78
0,1	0,89	0,91	0,96	0,97	0,98	0,98	0,97
0,2	0,89	0,89	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96
0,3	0,90	0,85	0,89	0,94	0,95	0,96	0,95
0,4	0,90	0,71	0,89	0,92	0,94	0,95	0,93
0,5	0,89	0,70	0,87	0,90	0,91	0,94	0,95
0,6	0,90	0,57	0,85	0,89	0,91	0,93	0,94

Ruído = 0,0001

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,72	0,85	0,84	0,85	0,89	0,88
0,1	0,11	0,85	0,93	0,94	0,94	0,96	0,95
0,2	0,08	0,80	0,94	0,93	0,94	0,95	0,93
0,3	0,08	0,62	0,96	0,90	0,94	0,94	0,94
0,4	0,07	0,72	0,81	0,87	0,91	0,98	0,97
0,5	0,07	0,50	0,78	0,96	0,89	0,92	0,94
0,6	0,06	0,81	0,78	0,83	0,86	0,91	0,91

Ruído = 0,001							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,34	0,63	0,82	0,90	0,92	0,93
0,1	0,00	0,50	0,72	0,88	0,94	0,96	0,96
0,2	0,00	0,64	0,79	0,91	0,95	0,97	0,98
0,3	0,00	0,67	0,83	0,91	0,94	0,98	0,97
0,4	0,00	0,70	0,80	0,92	0,95	0,96	0,98
0,5	0,00	0,64	0,81	0,88	0,96	0,97	0,98
0,6	0,00	0,61	0,79	0,91	0,98	0,95	0,96

Ruído = 0,001							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,28	0,49	0,70	0,77	0,81	0,83
0,1	0,11	0,10	0,37	0,67	0,83	0,88	0,87
0,2	0,13	0,21	0,48	0,73	0,84	0,92	0,93
0,3	0,11	0,25	0,54	0,75	0,84	0,93	0,92
0,4	0,10	0,31	0,50	0,76	0,84	0,87	0,93
0,5	0,09	0,23	0,52	0,68	0,88	0,90	0,95
0,6	0,08	0,18	0,50	0,75	0,92	0,85	0,89

Ruído = 0,01							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,11	0,23	0,32	0,43	0,52	0,61
0,1	0,00	0,17	0,25	0,34	0,43	0,52	0,61
0,2	0,00	0,25	0,33	0,41	0,49	0,57	0,65
0,3	0,00	0,31	0,40	0,49	0,56	0,63	0,69
0,4	0,00	0,36	0,45	0,54	0,61	0,67	0,73
0,5	0,00	0,41	0,50	0,58	0,65	0,71	0,78
0,6	0,00	0,45	0,54	0,63	0,69	0,74	0,78

Ruído = 0,01							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,10	0,19	0,27	0,34	0,40	0,49
0,1	0,05	0,03	0,10	0,20	0,27	0,36	0,41
0,2	0,09	0,06	0,04	0,13	0,20	0,29	0,36
0,3	0,11	0,09	0,08	0,11	0,15	0,22	0,30
0,4	0,12	0,13	0,11	0,11	0,14	0,24	0,37
0,5	0,13	0,13	0,12	0,13	0,17	0,30	0,43
0,6	0,13	0,14	0,12	0,20	0,25	0,36	0,44

Ruído = 0,1							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17	0,21
0,1	0,00	0,05	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20
0,2	0,00	0,08	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22
0,3	0,00	0,10	0,13	0,15	0,18	0,21	0,24
0,4	0,00	0,13	0,16	0,18	0,21	0,23	0,26
0,5	0,00	0,16	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29
0,6	0,00	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,32

Ruído = 0,1							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	0,03	0,06	0,09	0,11	0,15	0,19
0,1	0,01	0,01	0,03	0,06	0,10	0,12	0,15
0,2	0,03	0,02	0,01	0,03	0,06	0,10	0,12
0,3	0,05	0,04	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10
0,4	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,08
0,5	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05
0,6	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04

É possível observar que os dois métodos possuem resultados semelhantes quando o ruído é baixo. Ambos sofrem queda de desempenho ao aumentar a amplitude do ruído. Porém, os ciclos limite não podem ser mais observados com magnitude do ruído = 0,1, conforme Figura 4.6, e em alguns casos quando o ruído = 0,01. Então mesmo ocorrendo o agarramento, ele é totalmente camuflado pelo ruído. A porcentagem de resultados corretos obtidos pelos dois métodos está descrita na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Porcentagem de resultados corretos para detecção de agarramento utilizando o Método 1 proposto e Yamashita.

Ruído	*0*	*0.0001*	*0.001*	*0.01*	*0.1*
Método 1	100%	88%	88%	77%	15%
Yamashita	100%	88%	77%	31%	8%

Com ruído de 0,001, o desempenho do método proposto é de melhor qualidade, visto que o fenômeno de agarramento está presente, e a maioria das combinações de S e J resulta em valores a cima de 0,25.

Um exemplo em que o método proposto mostra resultado correto detectando o agarramento, enquanto Yamashita não observa, é o caso de ruído com amplitude de 0,001, S=0,1 e J=0,6. O gráfico MV-OP do exemplo está demonstrado na Figura 4.7, possuindo um padrão deformado pelo ruído, porém, com características de agarramento. A Figura 4.8 representa a variável manipulada (MV) ao longo do tempo, mostrando um ciclo limite também alterado pelo ruído, mas existente.

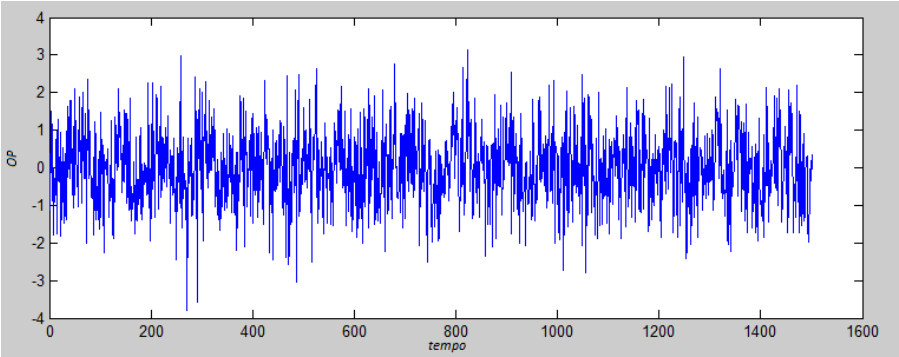

Figura 4.6: Ciclo limite em OP normalizado camuflado por ruído com amplitude de 0.1.

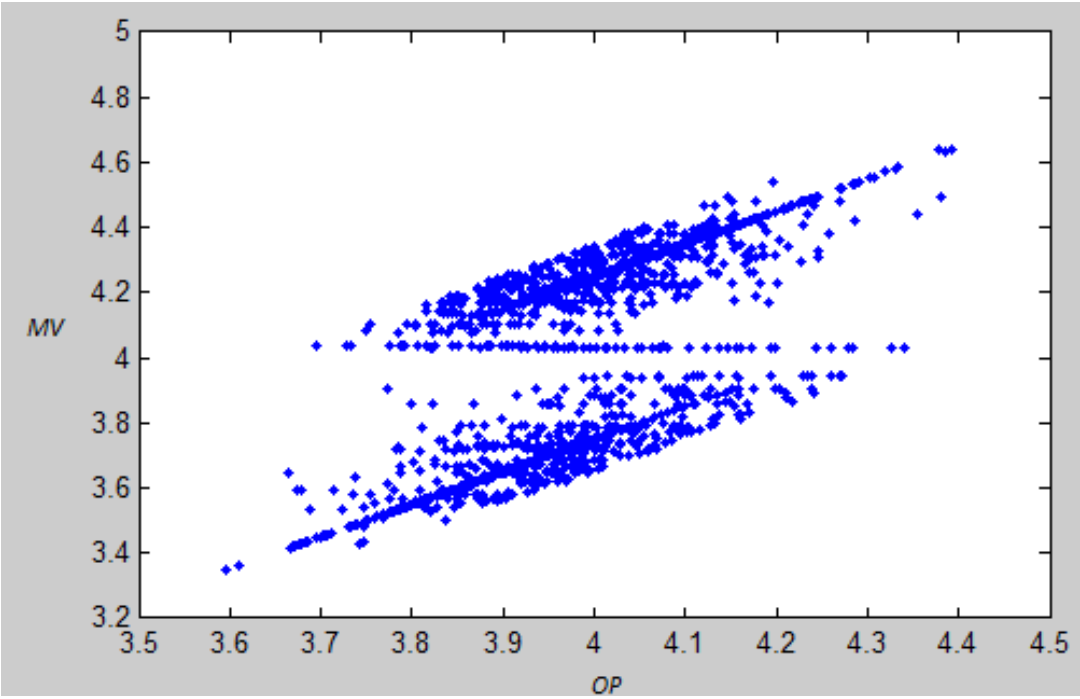

Figura 4.7: Diagrama MV-OP obtido após simulação de dados, com ruído de amplitude de 0,001, S=0,1 e J=0,6.

O resultado obtido para este caso, como descrito na Tabela 4.1, com o método de Yamashita é de ρ_1 = 0,18, inferior ao critério de 0,25. No caso do método proposto, o resultado foi de 0,61, superior a 0,25, e detectando assim o agarramento.

Foi também realizado um teste variando a amplitude do seno gerado pelo controlador mal ajustado, sem a presença de agarramento. Ambos os métodos detectaram corretamente a ausência do fenômeno.

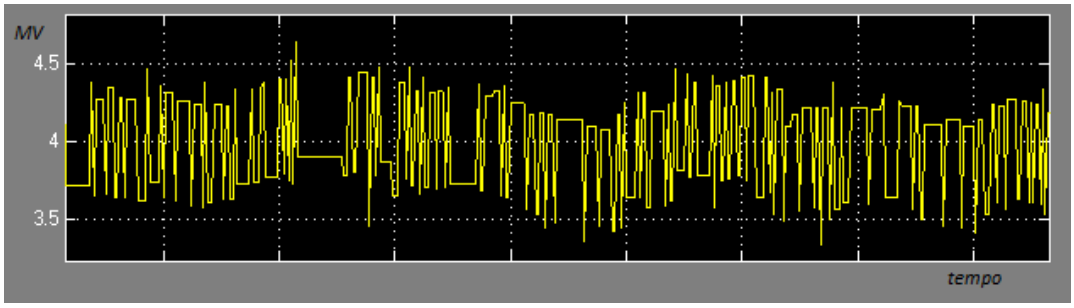

Figura 4.8: Ciclo limite de oscilação de MV, alterado pela presença de ruído.

4.2.2 Segundo Método Proposto

Para o segundo método proposto por este trabalho, foi realizado o mesmo procedimento realizado para o primeiro: variação da amplitude do ruído e dos parâmetros de agarramento. O resultado está demonstrado na Tabela 4.3.

Os resultados sugerem considerar agarramento quando o parâmetro proposto é superior a 0,3, visto que em caso de ruído, quando S e J são nulos, o valor obtido foi sempre de 0,27.

O método também falha ao detectar agarramento quando há muito ruído, devido a problemas na identificação de ciclos limite por estes estarem alterados e imperceptíveis, conforme Figura 4.6.

Tabela 4.3: Resultados obtidos para o segundo método proposto, com variação do sinal de ruído e parâmetros S e J.

Ruído = 0

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,1	0,89	0,93	0,89	0,94	0,96	0,96	0,98
0,2	0,91	0,52	0,78	0,86	0,91	0,96	0,97
0,3	0,90	0,34	0,69	0,74	0,80	0,86	0,91
0,4	0,91	0,37	0,57	0,67	0,75	0,81	0,93
0,5	0,84	0,39	0,44	0,63	0,87	0,74	0,79
0,6	0,91	0,52	0,58	0,52	0,68	0,69	0,75

Ruído = 0,0001

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,27	0,37	0,60	0,75	0,75	0,78	0,82
0,1	0,26	0,41	0,61	0,67	0,78	0,79	0,78
0,2	0,29	0,60	0,72	0,62	0,77	0,83	0,81
0,3	0,31	0,58	0,54	0,56	0,75	0,69	0,76
0,4	0,31	0,49	0,51	0,55	0,62	0,86	0,82
0,5	0,31	0,65	0,46	0,84	0,60	0,69	0,79
0,6	0,33	0,72	0,66	0,48	0,57	0,68	0,68

Ruído = 0,001

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,27	0,27	0,33	0,32	0,54	0,53	0,51
0,1	0,26	0,28	0,31	0,35	0,44	0,56	0,56
0,2	0,25	0,28	0,34	0,42	0,39	0,44	0,59
0,3	0,24	0,30	0,40	0,40	0,43	0,56	0,58
0,4	0,25	0,33	0,42	0,30	0,41	0,53	0,64
0,5	0,29	0,42	0,43	0,53	0,50	0,54	0,65
0,6	0,29	0,50	0,43	0,47	0,34	0,51	0,50

Ruído = 0,01

J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,27	0,28	0,27	0,28	0,33	0,32	0,37
0,1	0,27	0,27	0,28	0,26	0,32	0,28	0,31
0,2	0,27	0,26	0,25	0,28	0,29	0,27	0,33
0,3	0,27	0,26	0,27	0,28	0,41	0,31	0,30
0,4	0,24	0,27	0,26	0,28	0,37	0,31	0,32
0,5	0,26	0,26	0,23	0,29	0,39	0,30	0,31
0,6	0,24	0,25	0,24	0,29	0,30	0,30	0,32

Ruído = 0,1							
J \ S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27
0,1	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,26
0,2	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,27
0,3	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
0,4	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
0,5	0,28	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,28
0,6	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28

4.2.3 Terceiro Método Proposto

Conforme já descrito no item 3.3, a motivação deste método é a busca por padrões na derivada primeira quando há agarramento, de modo que sejam semelhantes ao exemplo industrial obtido, conforme Figura 4.9. Os resultados foram analisados graficamente, e assim também são dispostos neste trabalho.

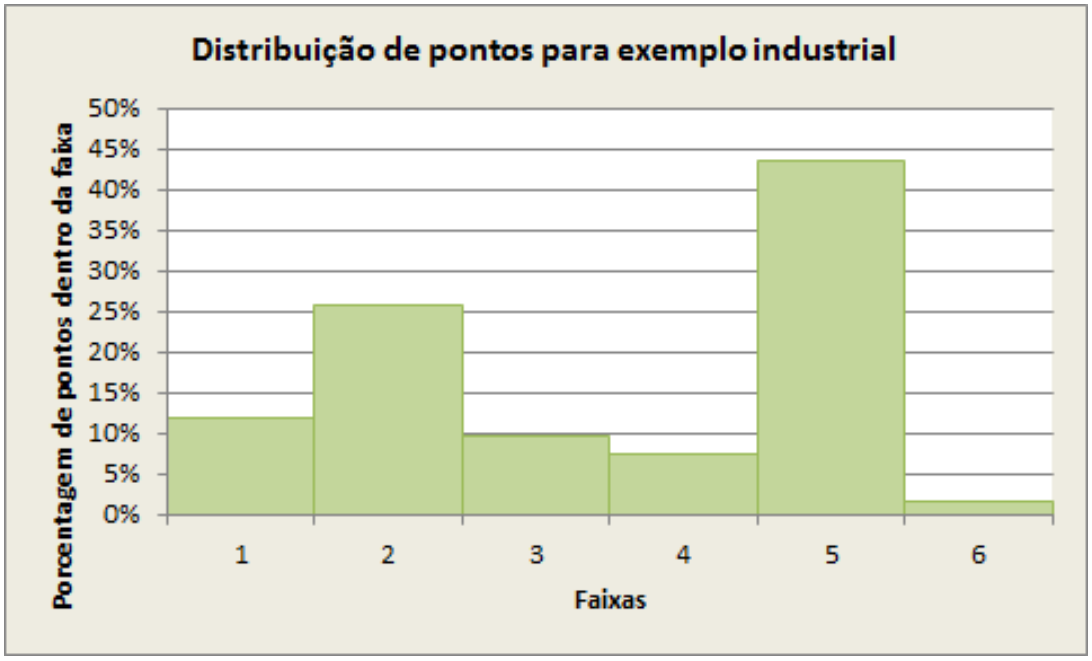

Figura 4.9: Distribuição de pontos em faixas, segundo o comportamento da derivada primeira de OP, em caso industrial

Foram então realizadas simulações para a validação do método. As Figuras Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 são o resultado da compilação de dados obtidos, de forma a exemplificar o comportamento encontrado.

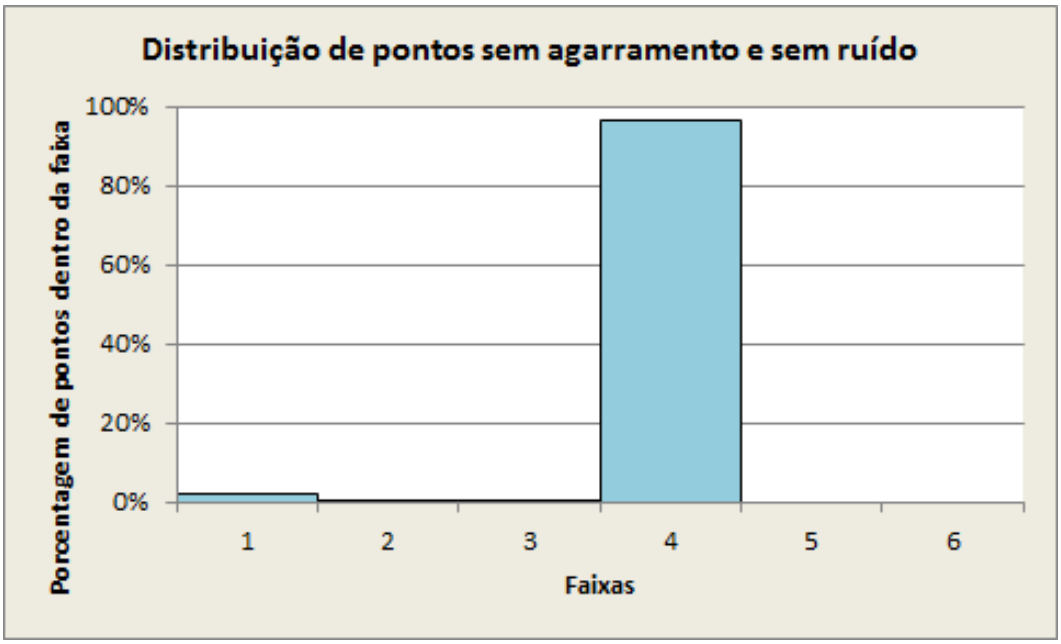

Figura 4.10: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando não há agarramento e ruído.

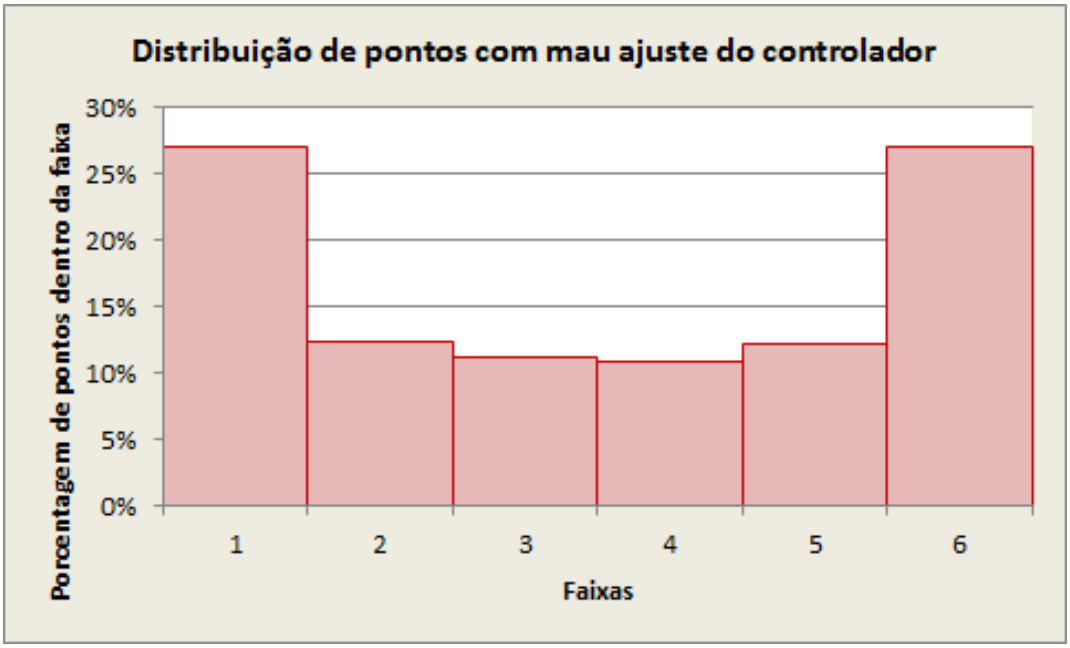

Figura 4.11: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando não há agarramento e ruído, porém com mau ajuste do controlador.

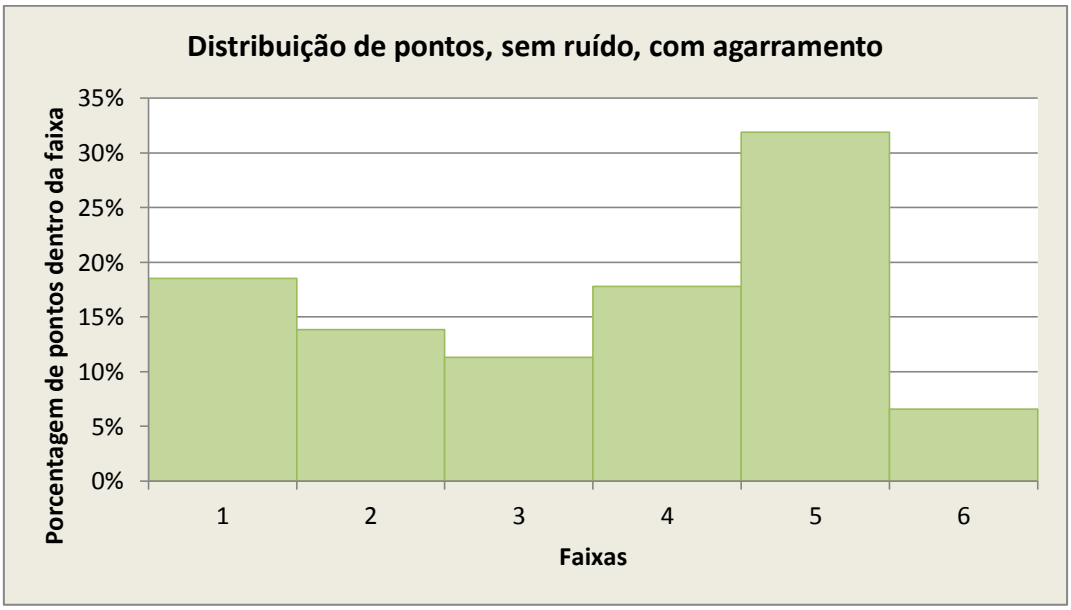

Figura 4.12: Distribuição de pontos em 6 faixas, quando há agarramento e ruído.

Quando não há agarramento e o controlador está bem ajustado, os pontos tendem a se encontrar nas faixas centrais, onde a derivada é próxima de zero. Isso se deve ao fato do output do controlador (OP) estar invariante com o tempo.

No caso de ajuste agressivo do controlador, os pontos tendem a se deslocar do centro, de modo a se concentrar nas faixas mais afastadas. Porém, quando o agarramento está presente, e não há ruído, o padrão se mostrou semelhante ao encontrado na Figura 4.9.

O incremento do ruído causa problemas ao método, visto que este usa a derivada primeira de OP para a alocação nas faixas. O resultado disto é a semelhança entre o comportamento com e sem agarramento, na presença de ruído, sendo difícil a diferenciação dos dois casos, conforme as Figuras Figura 4.13 e Figura 4.14.

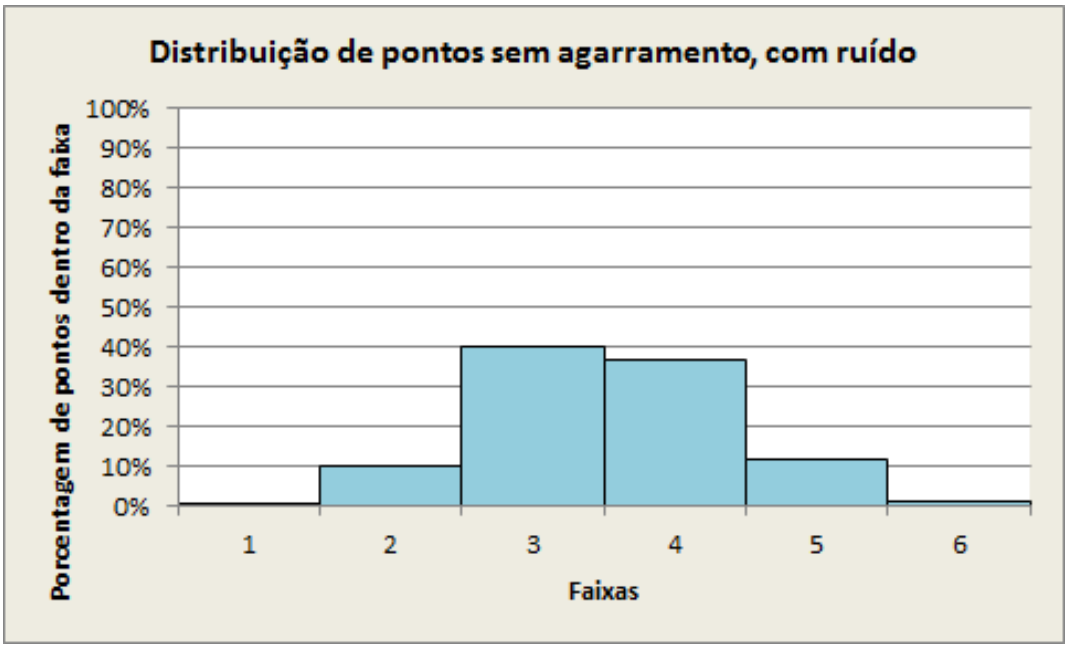

Figura 4.13: Distribuição de pontos baseada na derivada de OP, em 6 faixas, sem agarramento, com ruído.

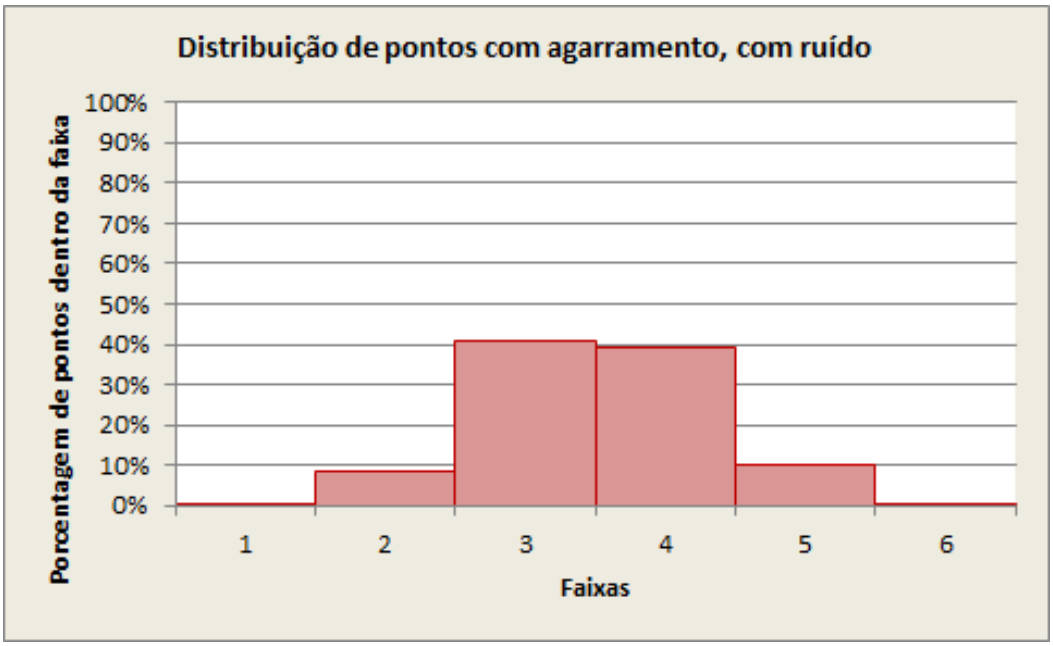

Figura 4.14: Distribuição de pontos baseada na derivada de OP, em 6 faixas, com agarramento, com ruído.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho objetivou a comparação entre as limitações dos métodos já existentes na literatura para detecção do fenômeno de agarramento em válvulas, além de propor três novas alternativas para a solução do problema.

Dentre os métodos encontrados na literatura para a detecção de agarramento, o que mais se destaca em relação aos demais é o de aproximação de dados por curvas senoidais ou triangulares, devido a sua vasta abrangência e poucas limitações. Porém, a partir de resultados de simulações, os resultados não foram satisfatórios.

Foram propostos três métodos neste trabalho: o primeiro é baseado no comportamento do gráfico MV-OP, em que a razão de eventos com baixa inclinação entre os dados e o total de pontos coletados resulta em um parâmetro capaz de definir a ocorrência do agarramento; o segundo método busca encontrar a distância entre as bordas da elipse formada em um gráfico PV-OP; e o terceiro visa encontrar padrões na derivada primeira dos pontos a fim de detectar o agarramento.

O primeiro método proposto teve resultado satisfatório. Porém, a necessidade de uso da variável MV, pouco acessível industrialmente, torna o método obsoleto. O segundo método requer os mesmos procedimentos iniciais de cálculo de NGI e NLI, além da aplicação de um filtro, para ser possível sua utilização. Apesar disto, os resultados foram utilizados para a determinação de um critério para detecção de agarramento. Assim, a utilização de dados industriais para sua validação é uma sugestão para futuros trabalhos.

O terceiro método mostrou ter resultados inconclusivos com a presença de ruído, devido à alteração da distribuição das derivadas dos dados, se distanciando do padrão buscado.

Ainda não existem métodos totalmente abrangentes, capazes de detectar o agarramento em condições extremas, sendo todos mais ou menos limitados. A necessidade da criação de técnicas mais eficazes ainda existe, de modo a evitar despesas operacionais consequentes do ciclo limite imposto pelo agarramento.

6 Referências

CHOUDHURY, M. A. A. S. *et al.* Automatic detection and quantification of stiction in control valves. **Control Engineering Practice**, 14, n. 12, p.1395-1412, Dezembro 2006.

CHOUDHURY, M. A. A. S.; JAIN, M.; SHAH, S. L. Stiction – definition, modelling, detection and quantification. **Journal of Process Control**, 18, n. 3-4, p.232-234, Março 2008.

CHOUDHURY, M. A. A. S.; SHAH, S. L.; THORNHILL, N. F. Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. **Automatica**, 40, n. 10, p.1719-1728, Outubro 2004.

CHOUDHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L. Modeling valve stiction. **Control Engineering Practice**, 13, n. 5, p.641-658, Maio 2005.

DESBOROUGH, L.; MILLER, R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience. **AIChE Symposium Series**, 98, n. 236, p.153-186, Janeiro 2002.

HE, Q. P. *et al.* A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 46, p.4549-4560, Maio 2007.

HORCH, A. A simple method for detection of stiction in control valves. **Control Engineering Practice**, 7, n. 10, p.1221-1231, Outubro 1999.

KANO, M. *et al.* Pratical model and detection algorithm for valve stiction. **7th IFAC-DYCOPS Symposium**, Boston, USA, Julho 2005.

KARNOPP, D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 107, n. 1, p.420-236, Março 1985.

KAYIHAN, A.; DOYLE, F. J. Friction compensation for a process control valve. **Control Engineering Practice**, 8, n. 7, p.799-812, Julho 2000.

MANUM, H.; SCALI C. Closed Loop Performance Monitoring: Automatic Diagnosis of Valve Stiction by means of a Technique based on Shape Analysis Formalism. **ANIPLA**, Roma, Itália, 2006.

OLSSON, H. Control Systems with Friction. Tese de PhD, Lund Institute of Technology, Suécia, 1996.

PAULONIS, M.; COX, J. A practical approach of large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement. **Journal of Process Control**, 13, n. 2, p.155-168, Março 2003.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Control loop performance assessment. 1. a qualitative approach for stiction diagnosis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 44, p.6708-6718, Julho 2005.

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**, 17, n. 7-9, Setembro-Novembro 2003.

YAMASHITA, Y. An automatic method for detection of valve stiction in process control loops. **Control Engineering Practice**, 14, n. 5, p.503-510, Maio 2006.