

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UBERDAN DA SILVA PLÁCIDO

CONTRIBUIÇÕES AO PROBLEMA DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO
EM VÁLVULAS PNEUMÁTICAS DE CONTROLE

VITÓRIA - ES, BRASIL
MARÇO DE 2019

UBERDAN DA SILVA PLÁCIDO

CONTRIBUIÇÕES AO PROBLEMA DE COMPENSAÇÃO DE
ATRITO EM VÁLVULAS PNEUMÁTICAS DE CONTROLE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Orientador: Prof^ª. D.Sc. Jussara Farias Fardin.

Vitória, ES - Brasil
11 de Março de 2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P698c Placido, Uberdan da Silva, 1983-
Contribuições ao problema de compensação de atrito em
válvulas pneumáticas de controle / Uberdan da Silva Placido. –
2019.
83 f. : il.

Orientador: Jussara Farias Fardin.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Atrito. 2. Válvulas de controle pneumático. 3. Sistemas
inteligentes de controle. 4. Automação industrial. 5. Processos
industriais. 6. Compensação de Atrito. I. Fardin, Jussara Farias.
II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
III. Título.

CDU: 621.3

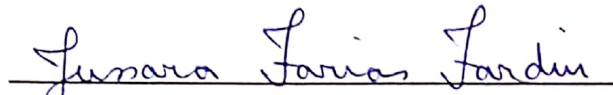
UBERDAN DA SILVA PLÁCIDO

CONTRIBUIÇÕES AO PROBLEMA DE COMPENSAÇÃO DE
ATRITO EM VÁLVULAS PNEUMÁTICAS DE CONTROLE

Dissertação de Mestrado, submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 11 de Março de 2019.

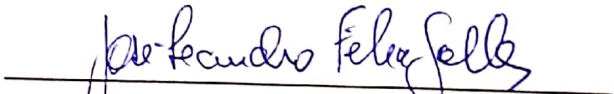
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo - Brasil
Orientador



Prof. D.Sc. Marco Antonio de Souza Leite Cuadros
Instituto Federal do Espírito Santo - Brasil



Prof. D.Sc. José Leandro Felix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo - Brasil

*Agradeço a Deus acima de tudo, por ser essencial em minha vida, aos meus pais, às
minhas irmãs e à minha esposa.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos professores Celso José Munaro, Patrick Marques Ciarelli, José Leandro Félix Salles e Jussara Farias Fardin por todo apoio e por compartilhar os seus conhecimentos.

Aos nobres colegas do laboratório de controle e instrumentação (LCI), em especial Vinícius Belmuds, Felipe Lobo, Daniel Carmo e Heitor Guzzo, foram peças fundamentais.

À TRANSPETRO pelo incentivo na realização do mestrado, e em especial aos colegas de trabalho Élcio Cruz, Alam Menezes, Renan Mainard e Henrique Assis.

Aos meus familiares, pois muitos deles viram os meus esforços.

Ao PPGEE, pela confiança.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade.

À Dra. Angélica pelas orientações.

Em especial a minha esposa Ranielle, onde peço desculpas por aceitar os momentos de minha ausência e mesmo assim sempre esteve ao meu lado com muito companheirismo.

*“Onde os fortes ousaram e chegaram,
Os fracos (...), eles nem tentaram
E os covardes (...), esses desistiram”*
Uberdan Plácido

RESUMO

As válvulas pneumáticas podem ser encontradas nos mais diversos parques industriais e são usadas diariamente nas mais diversas malhas de controle. Porém, quando expostas aos mais diversos fatores climáticos, elas tendem a aumentar o atrito entre suas partes móveis. Quando o agarramento ocorre é comum provocar variabilidade no processo, reduzindo o desempenho da malha e aumentando a ineficiência do processo. Portanto, reduzir a variabilidade em malhas de controle introduzidas pelo atrito nas válvulas tem se destacado por melhorar a produtividade dos processos e reduzir os custos operacionais. Baseado nas necessidades apresentadas, o presente trabalho propõe reduzir a variabilidade de um processo aumentando o índice de desempenho da malha e reduzindo a quantidade de movimento de abertura e fechamento da válvula. Para alcançar este objetivo, serão avaliados os efeitos de diversos parâmetros de modelos usados na quantificação e na compensação do atrito. Baseado nesta avaliação, serão analisados os efeitos em um compensador de atrito com amplitude variável dos pulsos, modulando a amplitude dos pulsos de forma proporcional ao erro da malha de controle. Com base nos efeitos observados, o compensador de atrito com amplitude variável foi parametrizado e através de simulações foram comparados os índices de desempenho da malha de controle e a quantidade de movimento de abertura e fechamento obtidos pelos diferentes métodos. Após a realização das comparações entre os métodos, foi evidenciado através dos resultados que o compensador com amplitude variável, que foi inspirado em um trabalho da literatura, reuniu diversas características positivas de outros compensadores analisados, que proporcionaram um melhor índice de desempenho da malha de controle com a menor quantidade de abertura e fechamento da válvula. Logo, o método, ao reduzir a quantidade de movimento da válvula será capaz de prolongar a vida útil dela até a programação de uma manutenção corretiva.

Palavras-chaves: atrito. válvulas de controle pneumático. sistemas inteligentes de controle. automação industrial. processos industriais. compensação de atrito.

ABSTRACT

Pneumatic valves can be found in the most diverse industrial parks and are used daily in the most diverse control meshes. However, when exposed to the most diverse climatic factors, they tend to increase the friction between their moving parts. When grip occurs, it is common to cause process variability, reducing mesh performance and increasing process inefficiency. Therefore, reducing the variability in control meshes introduced by the valve friction has been highlighted by improving process productivity and reducing operating costs. Based on the presented needs, the present work proposes to reduce the variability of a process increasing the performance index of the mesh and reducing the amount of movement of opening and closing of the valve. To reach this objective, the effects of several model parameters used in the quantification and the compensation of the friction will be evaluated. Based on this evaluation, the effects on a variable amplitude attrition of the pulses will be analyzed, modulating the amplitude of the pulses in a proportional way to the control loop error. Based on the observed effects, the variable amplitude attrition compensator was parameterized and through simulations, the control mesh performance indices and the amount of opening and closing movement obtained by the different methods were compared. After the comparisons between the methods, it was evidenced through the results that the compensator with variable amplitude, which was inspired by a work of the literature, gathered several positive characteristics of other compensators analyzed, that provided a better index of performance of the control mesh with the least amount of opening and closing of the control valve. Therefore, the method, by reducing the amount of valve movements, will be able to extend the life of the control valve until programming a corrective maintenance.

Key-words: friction. pneumatic control valves. intelligent control systems. industrial automation. industrial processes. friction compensation.

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	A válvula de controle pneumática	17
1.2	Definição do atrito	17
1.3	Causas do atrito e seus efeitos nas malhas de controle	19
1.4	Justificativas do trabalho	20
1.5	Objetivos	20
1.6	Estrutura da dissertação	21
2	Quantificação de Atrito em Válvulas de Controle	22
2.1	Introdução	22
2.2	Métodos de quantificação de atrito	23
2.3	Método de quantificação de atrito baseado no ajuste da elipse	24
2.4	Método de quantificação de atrito baseado no modelo de <i>Hammerstein</i>	25
2.4.1	Identificação do modelo de <i>Hammerstein</i>	26
2.4.2	Técnicas de identificação do modelo de <i>Hammerstein</i>	27
2.4.3	Problemas na quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de <i>Hammerstein</i>	27
2.4.4	Problemas na quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de <i>Hammerstein</i> em malha fechada	28
2.4.5	Variações das técnicas de quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de <i>Hammerstein</i>	28
2.4.6	Passos para aplicação do método	29
2.5	Aplicação do método de quantificação de atrito em dados de simulação	30
2.5.1	Diagrama de blocos utilizado nas simulações	30
2.5.2	Efeitos de variações no parâmetro do salto	31
2.5.3	Efeitos da ordem do modelo	32
2.5.4	Efeitos do ganho proporcional da malha de controle	35
2.5.5	Efeitos do ruído	37
2.6	Aplicação do método de quantificação de atrito em dados reais	40
2.7	Conclusões do capítulo	45
3	Compensação de Atrito em Válvulas de Controle	46
3.1	Introdução	46
3.2	Métodos de compensação de atrito	47
3.3	Métodos de compensação de atrito com amplitude fixa	49
3.4	Aplicação dos métodos de compensação de atrito com amplitude fixa em casos de simulação	50

3.4.1	Diagrama de blocos utilizado nas simulações	50
3.4.2	O compensador de atrito <i>knocker</i>	50
3.4.2.1	Ajuste dos parâmetros do compensador	51
3.4.2.2	Efeitos da amplitude dos pulsos do compensador	53
3.4.3	O compensador de atrito reforço constante RC	55
3.4.3.1	Ajuste dos parâmetros do compensador	55
3.4.3.2	Efeitos da amplitude dos pulsos do compensador	57
3.5	Método de compensação de atrito com amplitude variável	58
3.5.1	Descrição do método	58
3.5.2	Passos para aplicação do método	58
3.5.3	Diagrama de monitoramento do erro absoluto	60
3.5.4	Diagrama do controlador PI	61
3.5.5	Limite sobre o erro absoluto	61
3.5.6	Amplitude dos pulsos do compensador	62
3.5.7	Função moduladora dos pulsos do compensador	63
3.6	Ajustes dos parâmetros do compensador	64
3.6.1	Diagrama de blocos utilizado nas simulações	64
3.6.2	Sintonia dos parâmetros do compensador	65
3.6.3	Sintonia da amplitude do compensador	65
3.6.4	Sintonia do valor do limite de erro	67
3.7	Aplicação do método de compensação de atrito com amplitude variável em casos de simulação	68
3.7.1	Efeitos da inclinação da rampa da função moduladora	70
3.7.2	Efeitos do limite sobre o erro absoluto	72
3.7.3	Efeitos do parâmetro n_p	73
3.8	Comparação entre os métodos com amplitude fixa e amplitude variável	74
3.9	Conclusões do capítulo	76
4	Conclusão	78
4.1	Conclusões e propostas de trabalhos futuros	78
	Referências	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama típico de uma válvula de controle do tipo pneumática utilizada em processos industriais	17
Figura 2 – Comportamento típico de uma válvula de controle com atrito apresentado por Choudhury, Thornhill e Shah (2005). Fonte: Cuadros, Munaro e Munareto (2012), p. 331.	18
Figura 3 – Ajuste de uma elipse ao gráfico de entrada e saída de um sistema, para estimar a banda de agarramento \hat{S} do atrito.	25
Figura 4 – Diagrama de blocos do modelo de <i>Hammerstein</i>	25
Figura 5 – Diagrama de blocos elaborado para realização das simulações e para a geração de dados utilizados nas simulações.	30
Figura 6 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes valores do salto J	31
Figura 7 – Comportamento das variáveis estimadas e simuladas do processo para valores de atrito $S = 3$ e $J(0$ e $2)$	32
Figura 8 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes ordens do modelo N	33
Figura 9 – Curva do erro MSE na quantificação de diferentes valores de S (banda morta mais banda de agarramento), e diferentes ordens do modelo N	34
Figura 10 – Variável de saída do processo PV simulada e estimada para os modelo de processo do tipo ARX(2,2,1) e do tipo ARX(22,22,1).	34
Figura 11 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes valores do ganho K_c	35
Figura 12 – Gráfico das variáveis de entrada e saída do processo ($OP \times PV$) com valores de banda morta mais banda de agarramento $S = 3$, para diferentes valores de ganho proporcional K_c	36
Figura 13 – Efeitos na quantificação de S para diferentes valores de potência de ruído	37
Figura 14 – Resultado da busca em grade na quantificação da banda morta mais banda de agarramento com $S = 3$ e potência de ruído $P_r = 0.03$	38
Figura 15 – Resultado da busca em grade na quantificação da banda morta mais banda de agarramento com $S = 6$ e $P_r = 0.03$	39
Figura 16 – Dados de uma válvula de controle de vazão. a) Variáveis OP e PV no domínio do tempo. b) Gráfico ($OP \times PV$).	40
Figura 17 – Efeitos na quantificação de S , para variações na ordem do modelo ARX	41
Figura 18 – Resultado da busca para o modelo de processo do tipo ARX(15,15,1).	42
Figura 19 – PV simulada e PV estimada para o modelo do tipo ARX(15,15,1).	43
Figura 20 – Efeitos na quantificação de S , para variações na ordem do modelo do processo do tipo do ARMAX	43
Figura 21 – Resultado da busca para o modelo de processo do tipo ARMAX(15,15,15,1).	44
Figura 22 – PV simulada e PV estimada para o modelo ARMAX(15,15,15,1).	45

Figura 23 – Diagrama de blocos generalizado para os compensadores de atrito, baseados na adição de pulsos ao sinal de controle, com amplitude fixa dos pulsos.	50
Figura 24 – Parâmetros do pulso do compensador de atrito <i>knocker</i>	51
Figura 25 – Simulação com o controlador PI até o instante de 200 s e ação do controlador PI mais o compensador <i>knocker</i> após o instante de 200 s.	52
Figura 26 – Efeito da amplitude do pulso no critério de desempenho <i>IAE</i> e na quantidade de movimento <i>QM</i> na válvula de controle.	54
Figura 27 – Simulação utilizando o controlador PI até o instante de 200 s e ação do controlador PI mais o compensador RC após 200 s.	56
Figura 28 – Efeito de diferentes escolhas do parâmetro <i>k</i> no critério de desempenho <i>IAE</i> e na quantidade de movimento <i>QM</i> na válvula de controle.	57
Figura 29 – Fluxograma do método de compensação de atrito com amplitude dos pulsos variável.	59
Figura 30 – Diagrama de blocos de contagem dos instantes de tempo nT_s com ($n > 0$) em que o erro absoluto $ e(t) $ está abaixo do limite de erro δ	60
Figura 31 – Diagrama de blocos utilizado para habilitar e desabilitar a ação integral do controlador PI.	61
Figura 32 – Erro absoluto $ e(t) $ obtido com <i>knocker</i> e amplitude com $0.5S$	62
Figura 33 – Parte do diagrama de blocos do compensador com amplitude dos pulsos variável utilizado para realizar o equacionamento do compensador.	63
Figura 34 – Diagrama de blocos do compensador com amplitude variável dos pulsos.	64
Figura 35 – Pulsos do compensador na mudança da referência de entrada $r(t)$ e com limite de erro $\delta=0.3$	66
Figura 36 – Erro absoluto obtido em uma malha de controle sob ação de um compensador de atrito <i>knocker</i> com amplitude dos pulsos fixa em $\alpha=0.5S$	67
Figura 37 – Erro absoluto com limite de erro ajustado em $\delta=0.3$ e amplitude variável dos pulsos entre $(0.1S$ e $1.0S)$ e $n_p=5T_s$	69
Figura 38 – Efeitos para diferentes escolhas de inclinação da função moduladora dos pulsos sobre os índices IAE e QM, com limite de erro $\delta=0.3$, amplitude dos pulsos variável entre $0.1S$ e $1.0S$	71
Figura 39 – Efeitos para diferentes escolhas do limite de erro δ sobre os índices IAE e QM, $n_p=5T_s$ e amplitude variável dos pulsos entre $(0.1S$ e $1.0S)$	72
Figura 40 – Efeitos para diferentes escolhas de n_p sobre os índices IAE e QM com amplitude variável dos pulsos e limite de erro $\delta=0.3$	74
Figura 41 – Comparação entre Métodos Sobre os índices QM e IAE.	75
Figura 42 – Comparação entre Amplitude Fixa e Variável Sobre QM e IAE.	76

Lista de Símbolos

OP	Saída do controlador
PV	Variável do processo
J	Banda de agarramento (Slip-jump)
S	Banda Morta mais J
SP	<i>Set Point</i>
MV	Variável Manipulada
$u_c(t)$	Saída do Controlador
$u_k(t)$	Sinal de compensação do método knocker
$u_{kv}(t)$	Sinal de compensação do método de amplitude variável
T_s	Tempo de Amostragem
FDP	Função Densidade de Probabilidade
CLP	Controlador Lógico Programável
ARX	textitAuto-Regressive with eXogenous Input
$ARMAX$	textitAuto-Regressive Moving Average with eXogenous Input
PI	Controlador Proporcional Integral
\hat{S}	Atrito aparente
m	Eixo maior da elipse
n	Eixo menor da elipse
y	Saída da válvula (posição)
G_p	Parte Linear da Válvula mais o Modelo do Processo
K_c	Ganho Proporcional

K_i	Ganho Integral
P_r	Potência do ruído
MSE	textitMean squared error
IOL	textitInput-output linearization
RC	<i>Constant reinforcement</i>
IAE	textitIntegral Absolute Error
QM	Quantidade de Movimento

Introdução

Processos industriais modernos possuem uma variedade de grandezas físicas que precisam ser controladas, e para isso são necessárias inúmeras malhas de controle interagindo e trocando informações entre si. O propósito das malhas de controle é garantir um bom desempenho operacional. Entretanto, por existir uma variedade de tipos de malhas de controle e cada uma com as suas particularidades, é importante realizar um acompanhamento periódico do seu funcionamento. O acompanhamento das malhas de controle permite identificar as oscilações na saída do processo ainda em sua fase inicial.

Em geral, as oscilações são provenientes de falhas em sensores, deficiências em projetos, distúrbios externos oscilatórios, malhas interconectadas, ajuste agressivo dos controladores e agarramentos mecânicos na haste das válvulas conforme mostrados em Taha, Dumont e Davies (1996), Miao e Seborg (1999), Srinivasan et al. (2005), Horch (2007). Os estudos conduzidos por Bialkowski (1993), Desborough, Nordh e Miller (2001), Qi e Huang (2011), indicam que os agarramentos nas hastes das válvulas representam cerca de 20% a 30% das causas das oscilações nas variáveis de saída dos processos.

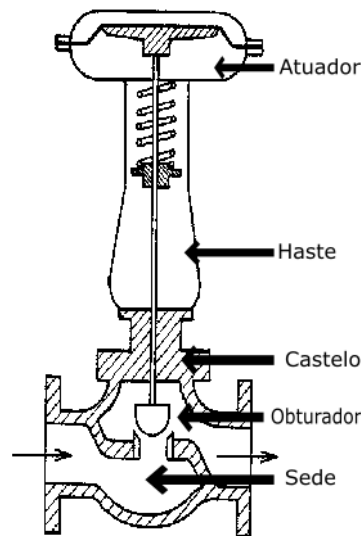
Geralmente, as oscilações em excesso são indesejadas, uma vez que aumentam a variabilidade dos processos, diminuem a qualidade dos produtos, contribuem com o aumento do consumo de energia e reduzem os lucros operacionais. O principal ônus proveniente das oscilações é a redução do desempenho da malha controle. Por outro lado, o correto funcionamento das válvulas de controle mostra-se de grande importância para obter e manter a eficiência dos processos industriais.

Assim sendo, eliminar a variabilidade nas malhas de controle é uma boa alternativa para mitigar esta problemática. Nesse sentido têm sido desenvolvidas técnicas de quantificação de atrito em válvulas de controle como mostradas em Srinivasan et al. (2005), Choudhury et al. (2006), Choudhury, Shah e Thornhill (2008), Jelali (2008) e técnicas de compensação de atrito como mostradas em Armstrong e Wit (1996), Kayihan e III (2000), Hägglund (2007), Ivan e Lakshminarayanan (2009) para a redução das oscilações.

1.1 A válvula de controle pneumática

As válvulas de controle do tipo pneumáticas são elementos finais de controle que estão presentes na maioria das malhas de controle de processos industriais. Elas são basicamente constituídas pelo atuador, haste, castelo, obturador e sede. Na Figura 1 é mostrado um diagrama típico de uma válvula de controle do tipo pneumática utilizada em diversos processos industriais.

Figura 1 – Diagrama típico de uma válvula de controle do tipo pneumática utilizada em processos industriais



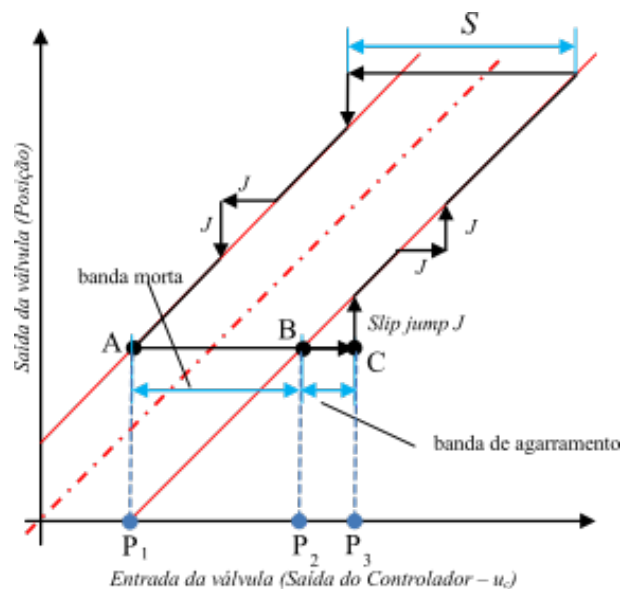
Na válvula de controle pneumática o atuador é o responsável por receber os comandos de abertura e de fechamento de um controlador externo e os converter em força para movimentar a haste da válvula. A haste da válvula é a responsável por transmitir os comandos de abertura e de fechamento recebidos pelo atuador que fica na parte superior da válvula, para o obturador que fica parte inferior do corpo da válvula, próxima da sede da válvula. O castelo é a parte da válvula que envolve parte da haste, obturador e a sede da válvula. O obturador fica na sede da válvula e está responsável por bloquear ou permitir a passagem do fluido conduzido. A sede da válvula é interligada nas tubulações da planta por onde o fluido do processo é conduzido.

1.2 Definição do atrito

O fenômeno do atrito possui diferentes definições encontradas nos artigos (OLSSON, 1996; HORCH, 1999; RUEL, 2000) e nas organizações (SUBCOMMITTEE, 1979; ENTECH, 1998). Segundo Cuadros (2011) os trabalhos conduzidos por Choudhury, Thornhill e Shah (2005) e Kano et al. (2004) foram os que apresentaram o modelo de atrito de dois parâmetros (S e J) mais completos, pois, nestes trabalhos foram reunidas as definições que melhor representam uma válvula de controle real.

As definições que representam o comportamento das válvulas de controle com atrito, foram obtidas através de investigações em conjuntos de dados coletados de válvulas de controle com atrito em processos reais. A partir de um dos conjuntos de dados, foi representado um gráfico com a variável de entrada do processo (OP) e com a variável de saída do processo (PV) onde foi possível observar a banda morta, banda de agarramento, salto e fase de movimento. O gráfico com as variáveis de entrada e de saída de um processo que representam o comportamento de uma válvula de controle com atrito, definido por Choudhury, Thornhill e Shah (2005) está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Comportamento típico de uma válvula de controle com atrito apresentado por Choudhury, Thornhill e Shah (2005). Fonte: Cuadros, Munaro e Munareto (2012), p. 331.



Na Figura 2 a banda morta é a região compreendida pelo seguimento \overline{AB} e a banda de agarramento é a região compreendida pelo seguimento \overline{BC} . Quando a válvula de controle para de se movimentar e retoma o seu movimento, ocorre o agarramento na haste e a válvula fica parada até que o sinal de controle u_c do controlador PI consiga superar o atrito existente. Quando o sinal de controle é maior do que a banda morta mais a banda de agarramento S , ocorre o efeito chamado de *slip-jump* J e o atuador da válvula dá um salto. Este efeito é uma liberação abrupta da energia potencial armazenada no atuador em energia cinética e logo após é iniciada a fase de movimento da válvula.

Em Choudhury (2004) é mostrado que a presença do salto J é o responsável por provocar o ciclo limite na válvula de controle e em Choudhury, Shah e Thornhill (2008) é mostrado que tanto a frequência quanto a amplitude do ciclo limite estão relacionadas com o salto J . Segundo Choudhury, Thornhill e Shah (2005) os efeitos da não linearidade em uma válvula de controle são definidos pelos parâmetros J (*slip-jump* ou banda de agarramento) e S (banda morta mais banda de agarramento J).

1.3 Causas do atrito e seus efeitos nas malhas de controle

Em uma válvula de controle, o castelo engloba os elementos de vedação e tem por finalidade impedir que o fluido controlado passe para o meio exterior da válvula através de sua haste. Dentro do castelo um componente comumente conhecido é a gaxeta que realiza uma compressão na haste da válvula para evitar vazamento do fluido, portanto, é comum mesmo que em válvulas de controle novas existir uma parcela de atrito inerente, porém com valores aceitáveis para um funcionamento normal.

As válvulas de controle comumente ficam expostas à diversas ações climáticas, tornando-se vulneráveis ao aparecimento de oxidação na haste e folgas por desgastes mecânicos. Outro fator é o acúmulo de partículas suspensas que se depositam entre o castelo e a haste da válvula contribuindo com o aumento do atrito existente e aumentando a resistência de oposição aos movimentos da haste da válvula. A presença do atrito em válvulas de controle pode ser diagnosticada por meio de métodos invasivos aplicados durante as paradas para manutenções preditivas ou corretivas. No entanto, segundo Choudhury et al. (2006) parar um processo para identificar possíveis problemas em válvulas de controle não é a melhor solução em um ambiente de produção industrial, pois os reparos devem ser realizados em oficinas especializadas na manutenção de válvulas de controle.

Nos casos em que é diagnosticado a necessidade da parada emergencial para realizar a manutenção, o procedimento utilizado é a substituição da válvula por outra sobressalente e enviar a válvula que foi substituída para uma oficina especializada em desmontar e reparar este tipo de válvula. O procedimento de substituição da válvula requer o envolvimento multidisciplinar de equipes de manutenção mecânica, caldeiraria, elétrica, instrumentação, automação e operação. Na troca da válvula, gastos adicionais com equipamentos auxiliares como geradores de energia, guindastes e caminhões para o transporte também são despendidos.

Portanto, o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico não invasivos são de grande importância para a indústria, principalmente na identificação da presença de atrito em malhas de controle. Um dos primeiros métodos de detecção de atrito não invasiva foi desenvolvido por Horch (1999), onde o atrito é caracterizado por meio de um gráfico, utilizando o sinal de saída do controlador (OP) e na saída do processo (PV). Posteriormente, Horch e Isaksson (2001) utilizaram a função densidade de probabilidade (FDP) no sinal de erro do controlador para avaliar a possível presença de atrito nas válvulas de controle. Posteriormente, alguns métodos foram propostos a fim de caracterizar a presença de agarramento em válvulas industriais baseado no padrão de comportamento dos sinais de entrada da válvula (OP) e no sinal de saída do processo (PV) conforme as técnicas de detecção e quantificação de atrito proposto por Choudhury et al. (2006).

1.4 Justificativas do trabalho

A parada emergencial para manutenção em uma válvula com atrito representa prejuízos para a unidade operacional, devido à complexidade das atividades e dos custos envolvidos. Entretanto, a possibilidade de realizar uma intervenção não invasiva que melhore o desempenho dessa malha até a próxima parada, traz ganhos significativos para o processo.

Nesse sentido, técnicas de quantificação e compensação de atrito em válvulas de controle podem ser empregadas. Assim, por meio de técnicas de quantificação é possível conhecer previamente o problema de agarramento e providenciar as ações necessárias para realizar a compensação sem a necessidade de uma parada de emergência operacional.

Logo, é possível aumentar o tempo de operação de uma válvula com agarramento, possibilitando realizar as devidas correções na próxima parada programada de manutenção. Portanto, é importante o desenvolvimento de técnicas que possibilitem detectar e quantificar com antecedência a presença do agarramento, realizar a compensação do atrito, e assim posteriormente incluir as válvulas com problemas em planos de paradas programadas.

1.5 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas de quantificação e compensação de atrito em malhas de controle utilizando um compensador com pulsos de amplitude variável adicionada a variável OP, utilizando o sinal de erro da malha de controle para modular a amplitude dos pulsos do compensador. Os objetivos específicos que deverão ser perseguidos neste trabalho serão:

- Analisar os efeitos dos parâmetros salto (slip-jump), da ordem modelo, do ganho proporcional do controlador PI e da potência do ruído no algoritmo de quantificação de atrito baseado no ajuste da elipse mostrado em Choudhury et al. (2006) e na identificação do modelo de *Hammerstein* mostrado em Srinivasan et al. (2005), Choudhury, Shah e Thornhill (2008), Jelali (2008);
- Aplicar os algoritmos de quantificação de atrito em dados coletados de um processo real e avaliar os efeitos para os modelos de processo do tipo ARX e ARMAX e os efeitos na ordem do modelo;
- Analisar os efeitos da amplitude dos pulsos do compensador de atrito com amplitude dos pulsos fixa do tipo *Knocker* proposto por Hägglund (2002) no algoritmo de compensação de atrito;

- Analisar os efeitos da amplitude dos pulsos k do compensador de atrito com amplitude fixa dos pulsos do tipo Reforço Constante (RC) proposto por Ivan e Lakshminarayanan (2009) no algoritmo de compensação de atrito;
- Analisar os efeitos da amplitude dos pulsos do compensador de atrito com amplitude variável no algoritmo de compensação de atrito;
- Analisar os efeitos dos parâmetros de inclinação da rampa da função moduladora dos pulsos, do limite sobre o erro e sobre os instantes de tempo para cessar os pulsos do compensador com amplitude variável e desabilitar a ação integral do controlador no algoritmo de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos;

1.6 Estrutura da dissertação

Os capítulos deste trabalho foram organizados da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte referente a quantificação de atrito, incluindo o método baseado no ajuste de uma elipse e o método baseado no modelo de *Hammerstein* utilizado por Srinivasan et al. (2005) para quantificar o atrito. O método de quantificação de atrito baseado no modelo de *Hammerstein* foi avaliado por meio de simulação usando dados reais de processo. .
- No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte referente a compensação de atrito em válvulas de controle, é também apresentado o método com amplitude dos pulsos variáveis e a aplicação do método em casos de simulação. São também avaliados os efeitos para diferentes escolhas dos parâmetros do compensador.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação dos métodos de compensação e quantificação de atrito avaliado.

Partes dos resultados deste trabalho foram publicados no Congresso Brasileiro de Automação, no ano de 2018, na cidade de João Pessoa. O artigo publicado foi: Placido, U. S., Munaro, C. J., & Faria, H. G. Integração de um compensador de atrito com amplitude variável em uma válvula de controle industrial. In: XXII Congresso Brasileiro de Automação, 2018, João Pessoa. Anais do XXII CBA 2018.

Capítulo 2

Quantificação de Atrito em Válvulas de Controle

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos métodos utilizados para quantificar o atrito em válvulas de controle. Dentre os métodos que serão apresentados, será dado maior destaque ao método baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* e as suas variações na quantificação do atrito em malhas de controle. Nas simulações e geração dos dados, as características do elemento não linear do atrito **será** representadas pelo modelo de atrito dois parâmetros de Choudhury et al. (2006) e a dinâmica do processo será representada por um modelo linear de primeira ordem.

A quantificação do atrito será realizada através de um algoritmo de busca em grade com a dinâmica do processo representada pelos modelos lineares do tipo ARX (*Auto-Regressive with eXogenous Input*) ou ARMAX (*Auto-Regressive Moving Average with eXogenous Input*). Serão realizadas simulações para analisar os efeitos na quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento) em variações no parâmetro do salto J , na ordem do modelo do processo N , no ganho proporcional do controlador PI e variações na potência de ruído.

A quantificação do atrito também será analisada em um conjunto de dados de um processo real, onde será realizada a quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento). O conjunto de dados foi coletado de uma válvula de controle com atrito em um processo real de uma malha de controle de vazão de líquido. Por fim, nas conclusões do capítulo serão realizadas discussões e comentários quanto aos efeitos observados nas análises na quantificação do atrito com os dados de simulações e com os dados de uma malha de controle real.

2.2 Métodos de quantificação de atrito

De acordo com Capaci e Scali (2018), os principais métodos de quantificação de atrito podem ser divididos em quatro grandes grupos:

- **Métodos de quantificação de atrito aparente:** São os métodos em que a quantificação de atrito é realizada por meio de um gráfico de ($OP \times PV$), obtido através do conjunto de dados coletados das variáveis do processo. Os métodos que fazem parte deste grupo são: *c-means*, *clustering c-means fuzzy* e ajuste da elipse de Choudhury et al. (2006);
- **Métodos de quantificação baseados no modelo de *Hammerstein*:** São os métodos em que a quantificação é realizada após identificação do sistema separando o elemento linear e o elemento não linear e observando o erro entre o modelo e os dados. Destacam-se os métodos apresentados por Srinivasan et al. (2005), Choudhury, Shah e Thornhill (2008), Jelali (2008);
- **Métodos não lineares baseados em modelos de processos:** São os métodos baseados no modelo do processo e um modelo não linear do atrito. Destacam-se os métodos apresentados por Wang, Wang e Chai (2009), Romano e Garcia (2011);
- **Métodos de abordagem mista:** São os métodos que realizam a detecção e quantificação no mesmo método. Destacam-se os apresentados por Zabiri, Maulud e Omar (2009), Araujo, Munaro e Filho (2012), He e Wang (2014).

Dentre a divisão dos grupos apresentados, alguns métodos possibilitam realizar a detecção e a quantificação do atrito em uma única etapa, enquanto os outros métodos apresentados somente possibilitam realizar a quantificação do atrito depois que a detecção é evidenciada. Nas próximas seções serão apresentadas algumas das principais técnicas de quantificação de atrito.

Choudhury et al. (2006) propuseram a estimativa do atrito a partir do ajuste de uma elipse sobre um diagrama da variável de saída do processo PV e a variável de saída do controlador OP . Assim, a largura máxima da elipse que se molda em torno do gráfico ($OP \times PV$) é calculada e denominada pelo autor de atrito aparente. Neste mesmo trabalho os autores também propuseram os algoritmos *c-means* e *clustering c-means fuzzy*. Nos dois últimos métodos citados, o atrito é estimado a partir do gráfico ($OP \times PV$).

Cuadros, Munaro e Munareto (2010) apresentaram uma versão aprimorada do algoritmo apresentado por Choudhury et al. (2006), onde os autores propõem ajustar uma elipse usando os pontos mais significativos dos sinais ($OP \times PV$). A limitação encontrada deste método é que a sua aplicação se limita a malhas de vazão, onde os gráficos de ($OP \times PV$) são semelhantes a um paralelogramo.

O método proposto por Stenman, Gustafsson e Forsman (2003) é uma combinação do modelo de atrito de Stenman e um modelo de processo do tipo ARX. Srinivasan e Rengaswamy (2005) propuseram uma combinação do modelo de um parâmetro de Stenman com um modelo de processo do tipo ARMAX.

O método proposto por Srinivasan e Rengaswamy (2005) foi aprimorado por Choudhury, Thornhill e Shah (2005), os autores utilizaram o seu próprio modelo de dois parâmetros, onde foi proposta uma busca de grade bidimensional, sendo necessário obter o parâmetro S (banda morta mais banda de agarramento) e o parâmetro do salto J .

O método de Jelali (2008) propõe uma otimização em dois estágios utilizando algoritmos genéticos, busca de grade e um estimador de mínimos quadrados. Neste trabalho, o modelo do processo é identificado pelo algoritmo de mínimos quadrados enquanto o modelo do atrito é obtido por meio de uma busca de grade.

2.3 Método de quantificação de atrito baseado no ajuste da elipse

O método de quantificação de atrito baseado no ajuste de uma elipse aos dados de entrada do processo OP e aos dados de saída do processo PV , coletados de uma malha de controle com atrito, permite obter um valor estimado para o parâmetro da banda morta mais banda de agarramento \hat{S} do atrito.

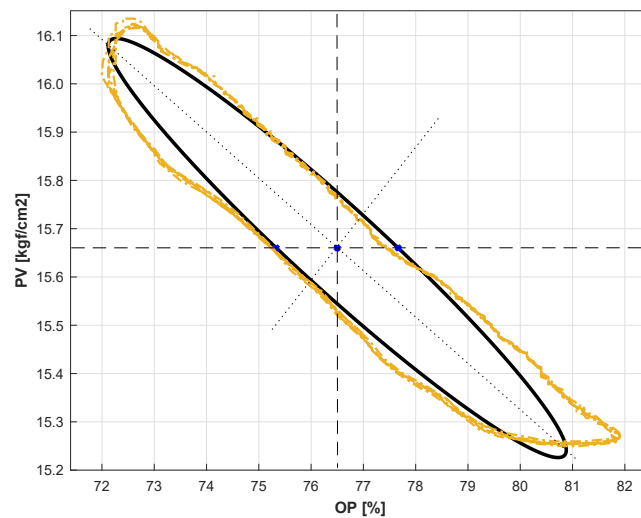
O gráfico ($OP \times PV$), obtido a partir dos dados coletados de um processo em malha fechada sob ação do atrito, possui um formato característico dentre as demais válvulas de controle sem atrito. Logo, o valor do atrito aparente é a distância entre as extremidades da elipse na direção da variável OP , passando pelo centro da elipse ajustada.

O valor do parâmetro \hat{S} obtido é comumente chamado de estimativa da banda de agarramento ou atrito aparente conforme mostrado em Gander, Strebel e Golub (1995). Em Choudhury et al. (2006) é mostrado que a estimativa do parâmetro do atrito é um valor aproximado do atrito real em malha fechada sob ação do atrito. O método descrito foi chamado pelo autor de *ellipse fitting* e definido através da Equação 2.1.

$$\hat{S}[\%] = \frac{2mn}{\sqrt{m^2 \sin^2 \alpha + n^2 \cos^2 \alpha}} \quad (2.1)$$

em que m e n são os comprimentos maior e menor dos eixos da elipse, respectivamente, e o parâmetro α é o ângulo de rotação da elipse em relação ao eixo da variável de entrada do processo OP . Na Figura 3 é apresentada uma elipse ajustada aos dados coletados das variáveis ($OP \times PV$) de um processo em malha fechada com atrito.

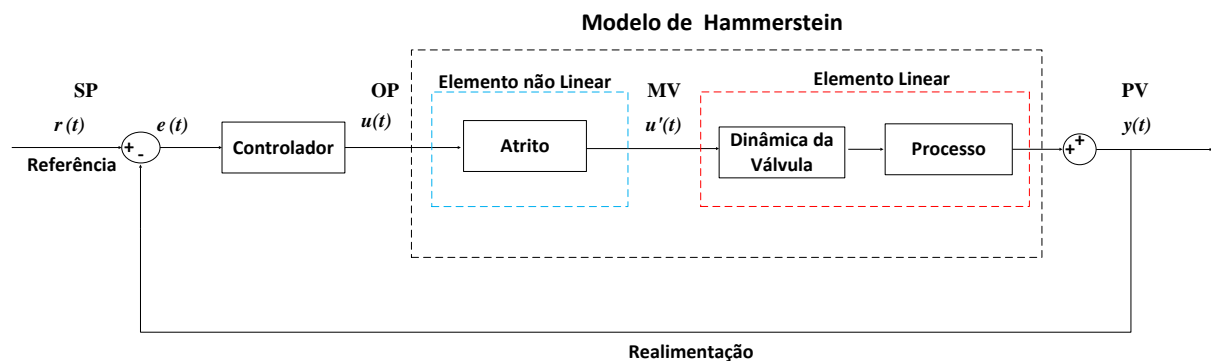
Figura 3 – Ajuste de uma elipse ao gráfico de entrada e saída de um sistema, para estimar a banda de agarramento \hat{S} do atrito.



2.4 Método de quantificação de atrito baseado no modelo de *Hammerstein*

O método de quantificação de atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* foi utilizado por Stenman, Gustafsson e Forsman (2003), Srinivasan et al. (2005) e Lee, Ren e Huang (2008) e promoveu avanços no processo da quantificação do atrito. A partir de um conjunto de dados coletados de uma planta em malha fechada com atrito é possível realizar a quantificação do atrito e a identificação da dinâmica do processo. Na Figura 4 é mostrado o diagrama de blocos do modelo de *Hammerstein*.

Figura 4 – Diagrama de blocos do modelo de *Hammerstein*.



O diagrama de blocos da Figura 4 mostra que o modelo de *Hammerstein* pode ser dividido em dois blocos principais sendo: um bloco com o elemento não linear, que representa o atrito na válvula e um outro bloco do elemento linear que é subdividido em outros dois blocos internos, sendo: um bloco interno que representa a dinâmica da válvula de controle, e um outro bloco interno que representa a dinâmica do processo.

2.4.1 Identificação do modelo de *Hammerstein*

Para realizar a identificação do modelo de *Hammerstein* são coletadas apenas as variáveis de entrada do processo *OP* representada por $u(t)$ e de saída do processo *PV* representada por $y(t)$. A identificação do modelo de *Hammerstein* é realizada desacoplando os elementos lineares e não-lineares do modelo. O bloco do elemento não linear dimensiona a entrada $u(t)$ e a transforma em $u'(t)$ e a saída do processo é um sistema linear invariante no tempo em função de $y(t)$. A saída do processo $y(t)$ normalmente é modelado por uma função de transferência linear discreta e a relação não linear $u(t)$ e $u'(t)$ pode ser representada por um polinômio finito conforme Equação 2.2.

$$u'(t) = \gamma_1 u(t) + \gamma_2 u^2(t) + \dots + \gamma_k u^k(t). \quad (2.2)$$

A variável do processo $y(t)$ é a saída de um sistema linear invariante no tempo modelado por uma função de transferência linear do tipo $G_p(q^{-1})$, onde q^{-1} é o operador de diferença para trás. No entanto, a variável $u'(t)$ é uma variável intermediária que não é possível de ser medida. É assumido que a dinâmica linear pode ser modelada usando um modelo de estrutura ARX, com regressores de saída e entrada de ordem n e m respectivamente, e então podemos representar a saída do processo $y(t)$ conforme a Equação 2.3.

$$y(t) = a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_n y(t-n) + b_1 u'(t-1) + b_2 u'(t-2) + \dots + b_m u'(t-m) + \xi(t), \quad (2.3)$$

onde $\xi(t)$ é ruído branco ou um ruído aleatório de medição. Substituindo a Equação 2.2 na Equação 2.3 é obtida a Equação 2.4.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \sum_{i=1}^k \gamma_i u^i(t-1) + \xi(t), \quad (2.4)$$

onde os polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ podem ser reescritos conforme Equação 2.5 e Equação 2.6, respectivamente.

$$A(q^{-1}) = 1 - a_1 q^{-1} - a_2 q^{-2} - \dots - a_n q^{-n}, \quad (2.5)$$

$$B(q^{-1}) = 1 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m}, \quad (2.6)$$

e usando a formulação de erro de predição desenvolvida por Ljung (1999), o preditor ótimo de um passo para $y(t)$ é calculado conforme Equação 2.7.

$$A(q^{-1})\hat{y}(t, \theta_N) = B(q^{-1}) \sum_{i=1}^k \gamma_i u^i(t-1) + \xi(t), \quad (2.7)$$

onde θ_N são os parâmetros do modelo $[a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m, \gamma_1, \dots, \gamma_k]$ obtidos a partir de N amostras os $(n + m + k)$ parâmetros do modelo são obtidos minimizando o critério de erro quadrático médio, conforme Equação 2.8.

$$V(\theta_N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t, \theta_N), \quad (2.8)$$

onde ϵ é calculado conforme Equação 2.9.

$$\epsilon(t, \theta_N) = y(t) - \hat{y}(t, \theta_N). \quad (2.9)$$

2.4.2 Técnicas de identificação do modelo de *Hammerstein*

Existe na literatura vários métodos de identificação de sistemas baseados no modelo de *Hammerstein* e, de acordo com Srinivasan et al. (2005) os primeiros pesquisadores que abordarem foram Narendra e Gallman (1966), entretanto, outras técnicas também foram desenvolvidas abrangendo a identificação do modelo de *Hammerstein*.

Algumas destas técnicas foram baseadas no uso de análise de correlação apresentada por Billings e Fakhouri (1979), Lakshminarayanan, Shah e Nandakumar (1995), técnica utilizando o método de variável instrumental por Stoica e Söderstrom (1982), e também o método baseado no erro de previsão por Eskinat, Johnson e Luyben (1991), Bai (1998).

Os métodos apresentados foram alguns dos métodos explorados para a realização da quantificação do atrito e identificação do modelo do processo baseados na identificação do modelo de *Hammerstein*.

2.4.3 Problemas na quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein*

Algumas questões devem ser consideradas antes que a quantificação do atrito e a identificação dos sistemas baseados no modelo de *Hammerstein* seja utilizado e as técnicas propostas sejam implementadas. Isto se deve, pois dentre as técnicas apresentadas os elementos linear e não linear do modelo são obtidos pelo critério do erro quadrático médio.

De acordo com Srinivasan et al. (2005), um trabalho apresentado por Stoica (1981) sobre identificação de sistemas baseados no modelo de *Hammerstein*, apresentou que as estimativas utilizando o critério de erro de mínimos quadrados não garantem uma correta identificação dos parâmetros.

Outra questão apresentada por Srinivasan et al. (2005) é que o elemento não linear é sem memória e representado por uma função descontínua e, de acordo com Eskinat, Johnson e Luyben (1991) os métodos analíticos baseados no gradiente do erro não são aplicáveis para este tipo de função. Um fator que também promove desvantagens em algumas das técnicas propostas, é que a ordem do modelo do elemento linear deve ser conhecida a priori.

2.4.4 Problemas na quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* em malha fechada

A coleta dos dados do processo é uma questão que deve ser considerada na identificação do modelo de *Hammerstein*, uma vez que os dados devem ser coletados de uma planta em malha fechada e garantir que a entrada do processo forneça uma excitação persistente, a fim de garantir uma correta identificação.

Em Bai (2002) é proposto uma técnica de identificação determinística baseada na teoria do problema dos mínimos quadrados separáveis. Segundo Srinivasan et al. (2005), esta técnica somente é aplicável a uma classe de sistemas de *Hammerstein*, pois, requer que o bloco não linear seja parametrizado por um único parâmetro de estrutura conhecida e possa manipular uma memória de não linearidades. O método proposto assegura uma convergência global e reduz a dimensão do espaço de busca dos parâmetros. Uma limitação no método é que o elemento não linear utilize somente o modelo de atrito de um parâmetro, de forma que a abordagem proposta pelo autor possa ser aplicada.

Em Bai (2004), o autor apresenta uma nova solução para a identificação do modelo de *Hammerstein* desacoplando o elemento não linear do elemento linear. Assim o elemento linear se torna um problema de identificação linear para o processo de identificação do modelo de *Hammerstein*. Logo, uma solução é utilizar um sinal do tipo PRBS (*pseudo random binary sequence*) como entrada no processo de identificação do modelo linear. Entretanto, uma limitação deste método é que essa proposta não é usual em uma malha de controle real.

2.4.5 Variações das técnicas de quantificação dos parâmetros do atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein*

Na literatura foram encontradas diversas pesquisas com a finalidade de quantificar o atrito através de combinações de técnicas de quantificação e identificação do modelo de processo baseados no modelo de *Hammerstein*. No trabalho apresentado por Stenman, Gustafsson e Forsman (2003) os autores propuseram uma combinação do modelo de atrito de um parâmetro de Stenman com um modelo de processo do tipo ARX.

Posteriormente, Srinivasan e Rengaswamy (2005) utilizaram uma combinação do modelo de atrito de um parâmetro de Stenman com um modelo de processo linear do tipo ARMAX. Choudhury, Shah e Thornhill (2008) utilizaram no elemento não linear o modelo de dois parâmetros dos próprios autores, e no modelo linear utilizaram um modelo de processo do tipo ARX e otimização dos modelos linear e não linear através da busca em grade.

Jelali (2008) por sua vez, contribuiu na sua pesquisa utilizando o modelo de *Hammerstein*. No elemento não linear foi utilizado um modelo de dois parâmetros de Kano et al. (2004) e algoritmo de otimização global. No elemento linear foi utilizado um modelo de processo do tipo ARMAX e algoritmo de otimização global. Inicialmente era utilizado um modelo de processo do tipo ARX com o método dos mínimos quadrados. Para otimizar a região de busca do atrito e obter um baixo custo computacional, o autor utiliza uma estimativa do atrito aparente \hat{S} através do método de ajuste da elipse.

Lee, Ren e Huang (2008), utilizaram um modelo do tipo ARX com mínimos quadrados para estimar os parâmetros do modelo linear. No modelo não linear foi utilizado o modelo de atrito de dois parâmetros de He et al. (2007) e o critério de Akaike.

2.4.6 Passos para aplicação do método

Para iniciar o processo de quantificação de S (banda morta mais banda de agarra-mento) e do salto J , utilizando o método baseado no modelo de *Hammerstein*, tomaremos como base o modelo apresentado na Figura 4.

O algoritmo para realizar a quantificação de atrito obedecerá nesse trabalho os seguintes passos:

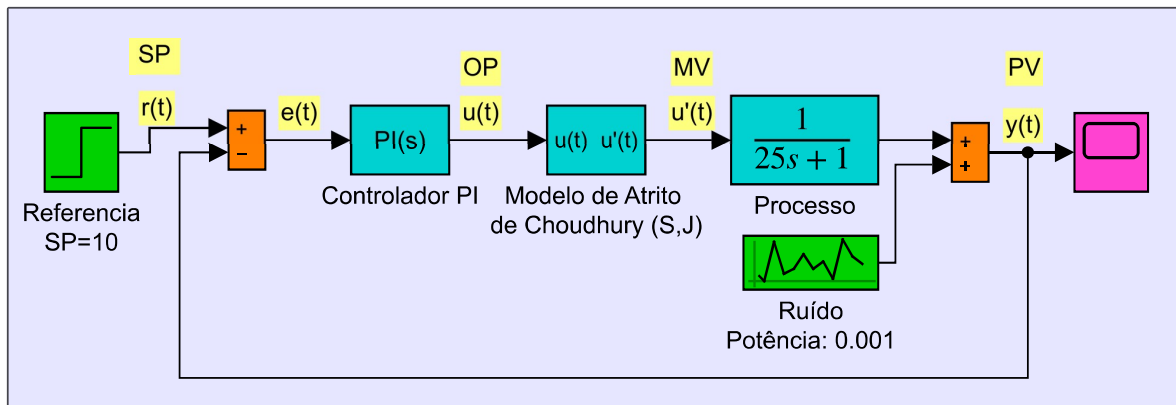
- **Passo 1** - Coletar os dados das variáveis de processo OP e PV ;
- **Passo 2** - Aplicar o método de ajuste da elipse apresentada na Seção 2.3 e obter uma estimativa de S (banda morta mais banda de agarra-mento) do atrito;
- **Passo 3** - Definir uma faixa de valores da banda morta mais banda de agarra-mento S e do salto J para a busca: para S (banda morta mais banda de agarra-mento) o intervalo $[0, \hat{S}]$ e para o salto J o intervalo $(0 \leq J \leq S)$;
- **Passo 4** - Para cada valor de S (banda morta mais banda de agarra-mento) e do salto J , gerar o sinal u' (Figura 4), usando o modelo de atrito de dois parâmetros, e usar u' e PV para obter um modelo linear representando o processo e a dinâmica da válvula, calculando o erro entre PV e a saída gerada pelo modelo obtido;
- **Passo 5** - Selecionar o menor valor do erro e obter os valores de S (banda morta mais banda de agarra-mento) e do salto J correspondentes, sendo estes os valores estimados;

2.5 Aplicação do método de quantificação de atrito em dados de simulação

2.5.1 Diagrama de blocos utilizado nas simulações

O objetivo desta seção é realizar a avaliação do método de quantificação de atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* em válvulas de controle através da realização de simulações. O diagrama de blocos utilizado para realizar as simulações e gerar os dados que serão utilizados nas Seções 2.5.2, 2.5.3, 2.5.4 e 2.5.5 é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de blocos elaborado para realização das simulações e para a geração de dados utilizados nas simulações.



onde $e(t)$ é o sinal de erro entre a referência de entrada $r(t)$ e a realimentação do sinal da variável de saída da malha de controle do processo $y(t)$. Nas simulações o controlador proporcional e integral PI utilizado é mostrado na Equação 2.10.

$$u(t) = K_c \left(e(t) + K_i \int e(t) dt \right), \quad (2.10)$$

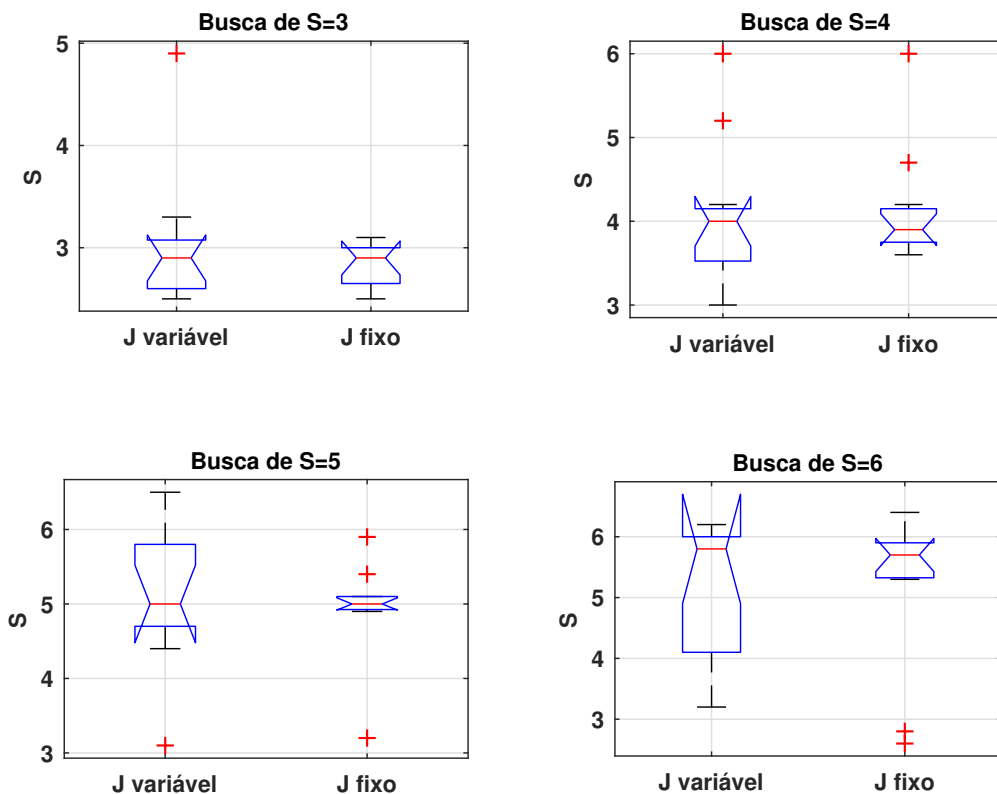
onde $u(t)$ é o sinal de saída do controlador proporcional e integral PI. Os parâmetros utilizados na sintonia do controlador são: ganho proporcional $K_c = 8.0$ e ganho integral $K_i = 0.1$. O atrito na válvula de controle é representado pelo modelo de atrito de dois parâmetros (S e J) de Choudhury e a dinâmica da válvula e a dinâmica do processo são representadas através do modelo de primeira ordem mostrado. O bloco ruído representa o ruído do processo através de uma sequência aleatória com densidade espectral de potência de amplitude 0.001.

2.5.2 Efeitos de variações no parâmetro do salto

Nesta seção, o objetivo é avaliar o efeito da variação do parâmetro do salto J na quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento). A quantificação do atrito será realizada utilizando o algoritmo da Seção 3.5.2, considerando o modelo de atrito de dois parâmetros de Choudhury e o processo utilizando um modelo linear do tipo ARX(4,4,1). Os resultados obtidos serão chamados de J variável e os parâmetros utilizados para realizar a quantificação do atrito serão: banda de agarramento $S = \{3, 4, 5, 6\}$, salto $J = 0.2k$ para $k = \{0.1, \dots, 10\}$.

Para realizar uma comparação com os resultados obtidos com J variável, uma nova quantificação do atrito será realizada. A nova quantificação será realizada com os valores de salto fixo e será chamada de J fixo. As simulações serão realizadas com os seguintes parâmetros: banda de agarramento $S = \{3, 4, 5, 6\}$, salto fixo em $J = 0.5$, e dez repetições para cada par $(S$ e $J)$. Os resultados da quantificação de J variável e J fixo com os valores de $S = \{3, 4, 5, 6\}$ são mostrados através dos gráficos do tipo *boxplot* na Figura 6.

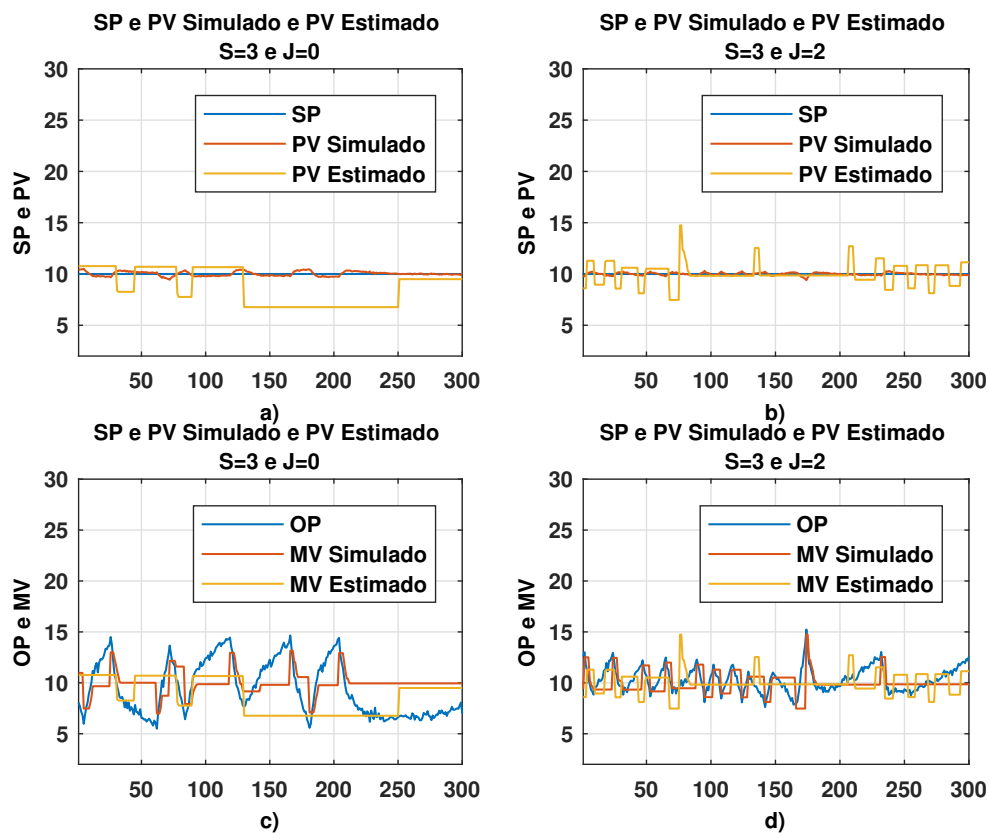
Figura 6 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes valores do salto J .



Conforme é observado no gráfico do tipo *boxplot* apresentado na Figura 6, os entalhes entre J variável e J fixo se sobrepõem. O entalhe em um gráfico *boxplot* significa um intervalo de confiança de 95% em torno da mediana. No caso em que dois ou mais conjuntos

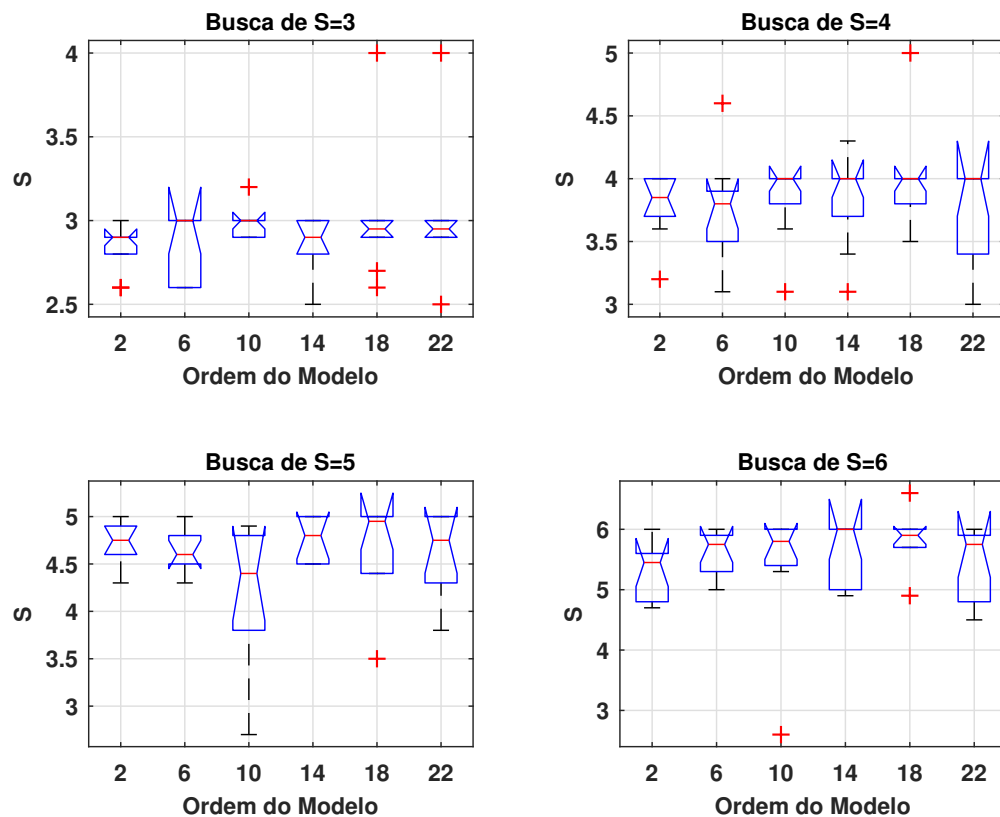
distintos estejam com entalhes sobrepostos, não é possível afirmar que os conjuntos de dados possuem medianas reais diferentes. Conforme é mostrado na Figura 6, a variação no parâmetro do salto não tem efeito significativo na quantificação da banda de agarramento, entretanto, na quantificação com J variável ocorre uma maior dispersão nos resultados da quantificação da banda de agarramento. Na Figura 7 são mostrados os comportamentos das variáveis OP , MV e PV , ilustrando o comportamento das variáveis na simulação da banda de agarramento para salto $J(0 \text{ e } 2)$, ambos com banda de agarramento $S = 3$.

Figura 7 – Comportamento das variáveis estimadas e simuladas do processo para valores de atrito $S = 3$ e $J(0 \text{ e } 2)$.



2.5.3 Efeitos da ordem do modelo

Nesta seção, o objetivo é avaliar os efeitos de variações na ordem do modelo do processo do tipo $ARX(N, N, 1)$ na quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento). A quantificação será realizada com o modelo de atrito de dois parâmetros (S e J) de Choudhury. Os parâmetros da quantificação serão: banda de agarramento $S = \{3, 4, 5, 6\}$, salto $J = 2$ e ordem do modelo $N = \{2, 6, 10, 14, 28, 22\}$. Os resultados obtidos no processo de quantificação do atrito para diferentes ordens do modelo são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes ordens do modelo N .

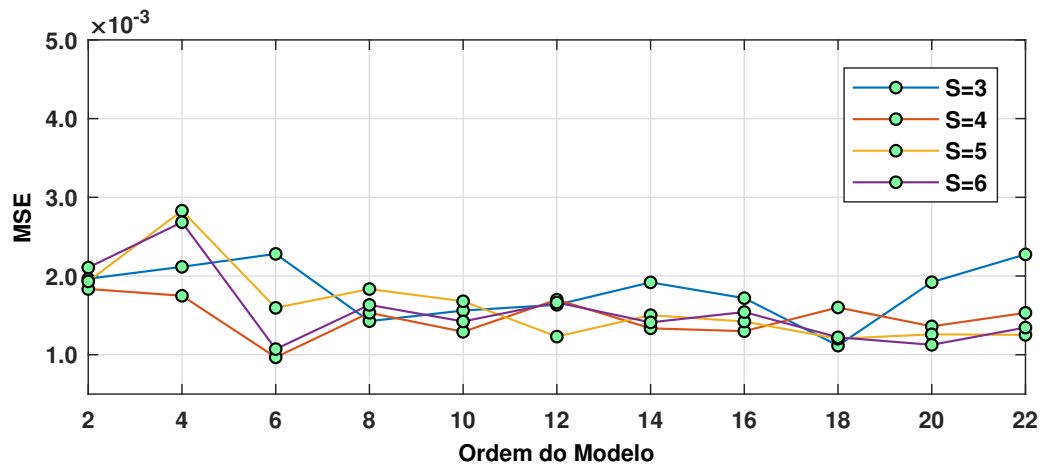
Na Figura 8 são mostrados através dos gráficos que ao realizar as buscas para os valores de banda morta mais banda de agarramento para $S = 3$ e $S = 4$, quando a ordem do modelo N é aumentada existe uma tendência do valor da mediana estar mais próxima do valor de S real procurado.

Os resultados para as buscas dos valores de $S = 5$ e $S = 6$, quando a ordem do modelo N é aumentada, os resultados não apresentaram uma tendência do valor da mediana em ambos os gráficos de estarem mais próximos dos valores do S real procurado.

Na Figura 9 são mostradas as curvas do erro quadrático médio MSE, na quantificação de diferentes valores de banda de agarramento S versus ordem do modelo N . O comportamento da curva do erro MSE mostrado, apresenta um decaimento no valor do erro até a ordem do modelo de $N = 6$ e a partir desta ordem é mostrado uma pequena redução no erro MSE.

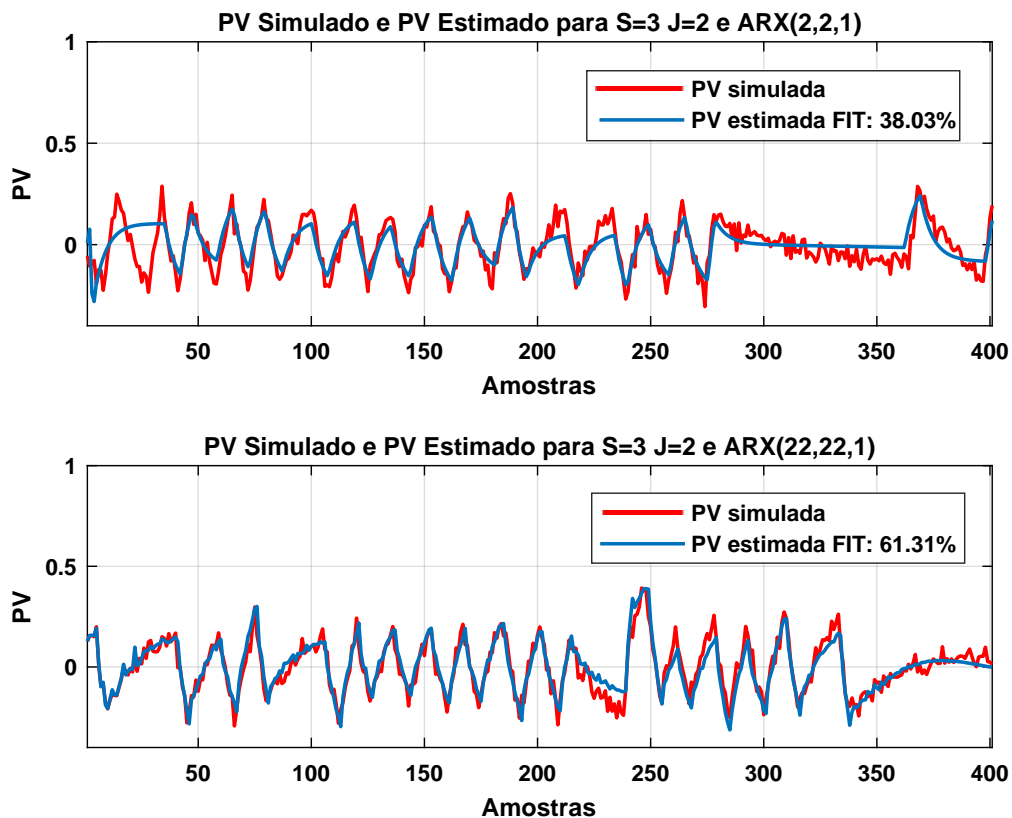
Esse resultado implica em quanto menor for o erro obtido, melhor será representado o comportamento da dinâmica do processo e mais precisa a estimativa do atrito, conforme concluído na análise da Figura 8.

Figura 9 – Curva do erro MSE na quantificação de diferentes valores de S (banda morta mais banda de agarramento), e diferentes ordens do modelo N .



Na Figura 10 são mostradas as estimativas da variável de saída do processo PV para um modelo de processo do tipo $ARX(2,2,1)$ e outra para um modelo $ARX(22,22,1)$, ambas para o par ($S = 3$ e $J = 2$), onde se enfatiza uma melhoria obtida na estimativa da variável PV , quando é aumentada a ordem do modelo do processo.

Figura 10 – Variável de saída do processo PV simulada e estimada para os modelo de processo do tipo $ARX(2,2,1)$ e do tipo $ARX(22,22,1)$.

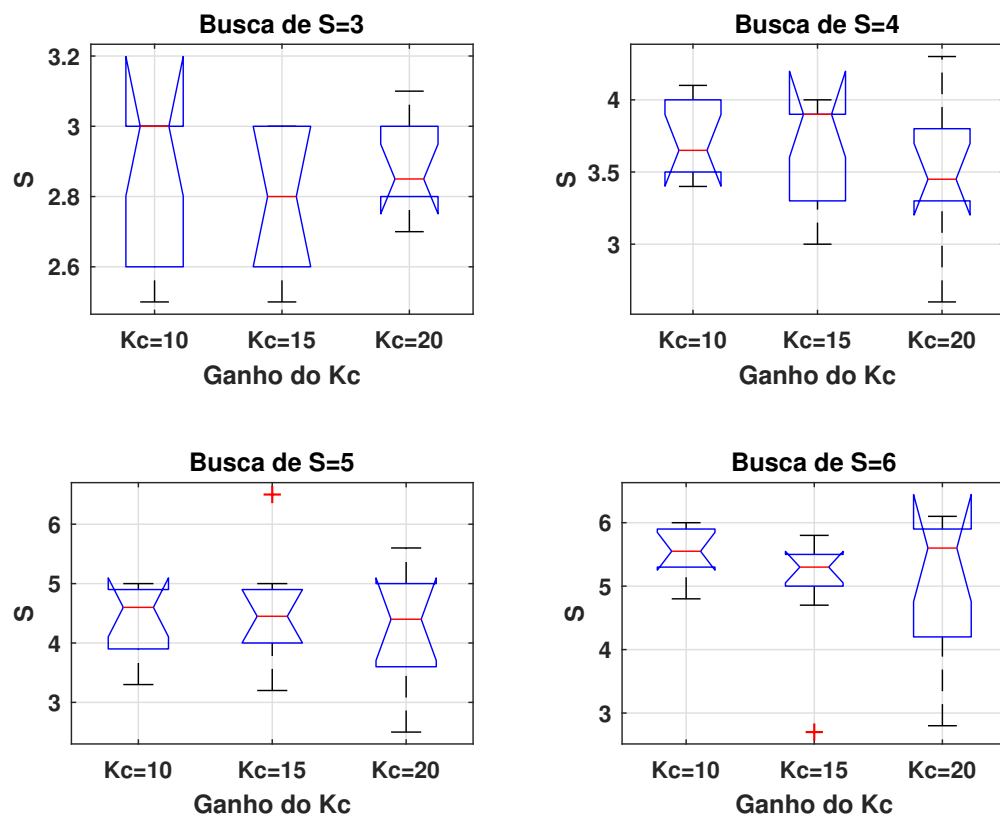


2.5.4 Efeitos do ganho proporcional da malha de controle

Nesta seção, o objetivo é avaliar os efeitos das variações no parâmetro do ganho proporcional K_c do controlador PI da malha de controle, na quantificação S (banda morta mais banda de agarramento). A quantificação será realizada com modelo de processo linear do tipo ARX(4,4,1) e com o modelo de atrito de dois parâmetros (S e J) de Choudhury.

Os parâmetros que serão utilizados na realização da quantificação serão: banda morta mais banda de agarramento $S = \{3, 4, 5, 6\}$, salto $J = 2$ e ganho proporcional $K_c = \{10, 15, 20\}$, repetindo a quantificação dez vezes para cada par (S e J). Os resultados obtidos na quantificação de atrito ao variar o parâmetro do ganho proporcional são mostrados na Figura 11.

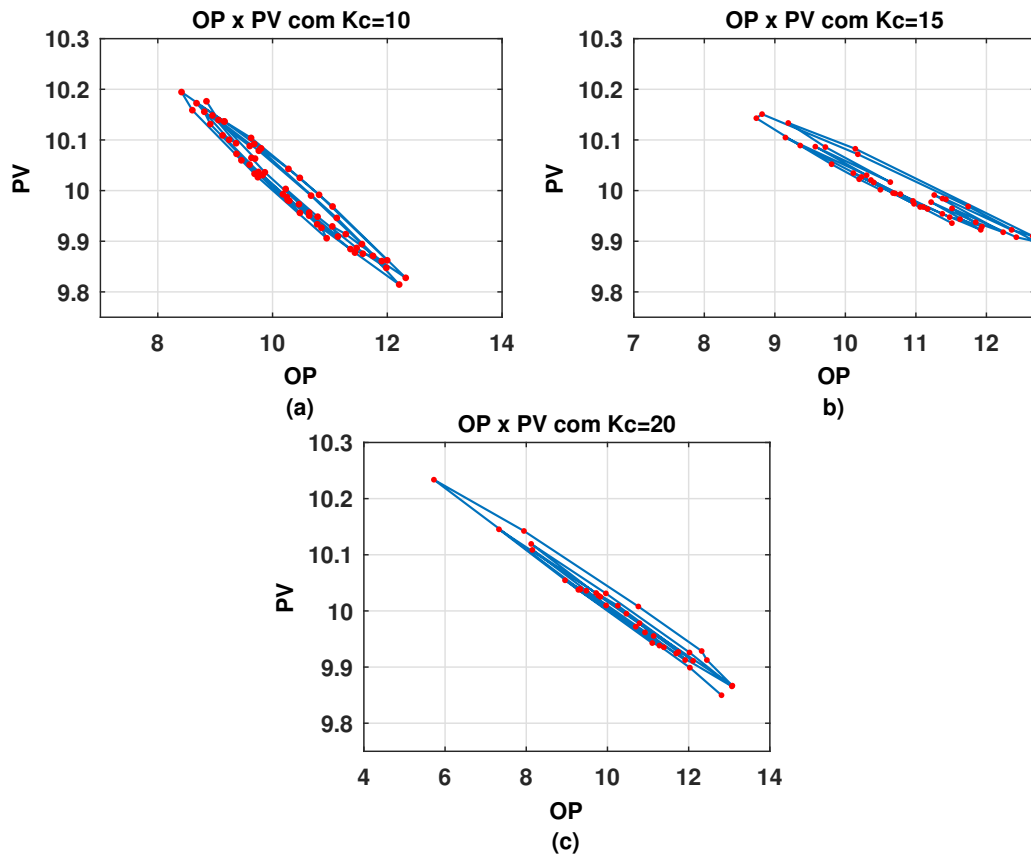
Figura 11 – Efeitos na quantificação de S , para diferentes valores do ganho K_c .



Conforme é mostrado na Figura 11, é possível observar que existe uma tendência da mediana se afastar do valor de S real com o aumento do ganho proporcional, entretanto, ainda foi possível realizar a quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento) próxima dos valores reais de S .

Na Figura 12 é mostrado o comportamento das variáveis de entrada e saída do processo através do gráfico ($OP \times PV$), para diferentes valores do ganho proporcional $K_c = \{10, 15, 20\}$, todos com valores de banda morta e banda de agarramento $S = 3$.

Figura 12 – Gráfico das variáveis das variáveis de entrada e saída do processo ($OP \times PV$) com valores de banda morta mais banda de agarramento $S = 3$, para diferentes valores de ganho proporcional K_c



O gráfico ($OP \times PV$) tem por finalidade demonstrar as características de uma válvula de controle sob a presença do atrito, por meio de um desenho aproximado de uma elipse, obtida através de um conjunto de dados das variáveis de entrada do processo OP e da variável de saída do processo PV , onde também é mostrado a possibilidade de obter a amplitude dos sinais das variáveis OP e PV .

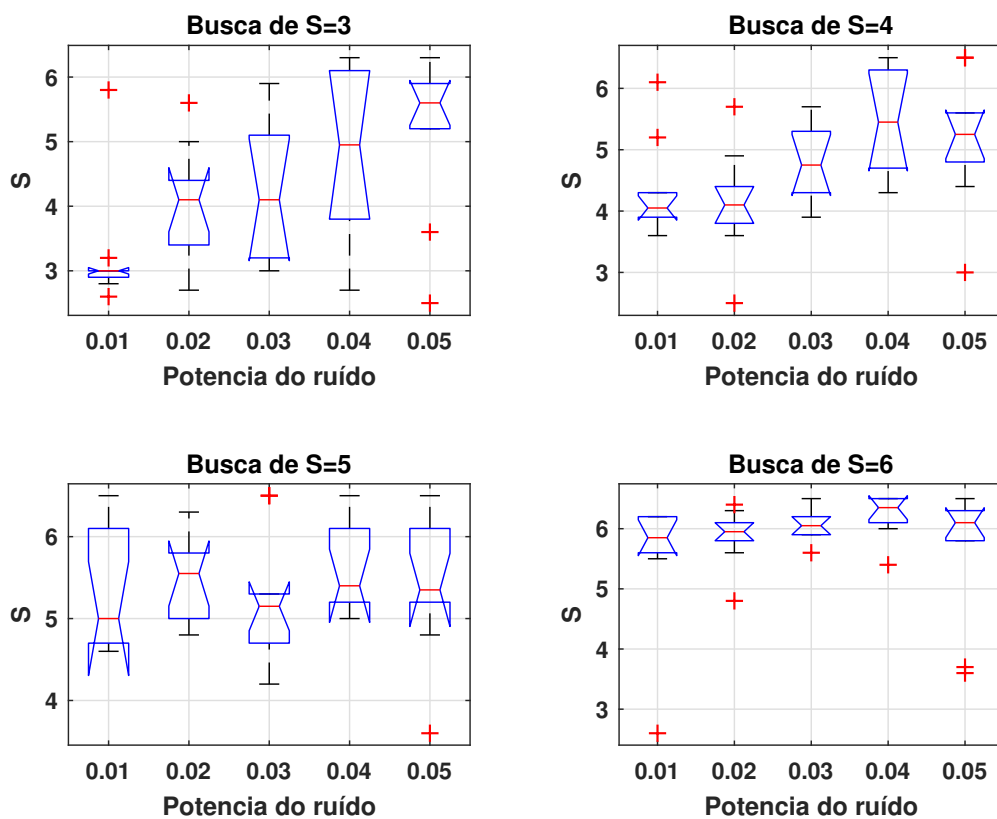
No gráfico da Figura 12, é mostrado que o aumento no valor do parâmetro do ganho proporcional K_c , provoca um aumento no valor da variável de saída do controlador OP e no valor da variável de saída do processo PV , entretanto, mesmo com esse aumento nos valores das variáveis OP e PV , o algoritmo foi capaz de realizar a quantificação da banda morta mais banda de agarramento S próxima do valor real.

2.5.5 Efeitos do ruído

Nesta seção, o objetivo é avaliar os efeitos da variação da potência do ruído P_r , na quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento). A quantificação será realizada com modelo de processo linear do tipo ARX(4,4,1) e modelo de atrito de dois parâmetros (S e J) de Choudhury.

Os parâmetros para realização da quantificação serão: banda morta mais banda de agarramento $S = \{3, 4, 5, 6\}$, valor do salto $J = 2$ e valores de potência de ruído $P_r = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05\}$. Os resultados obtidos na quantificação da banda morta mais banda de agarramento S para os diferentes valores de potência do ruído são mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Efeitos na quantificação de S para diferentes valores de potência de ruído

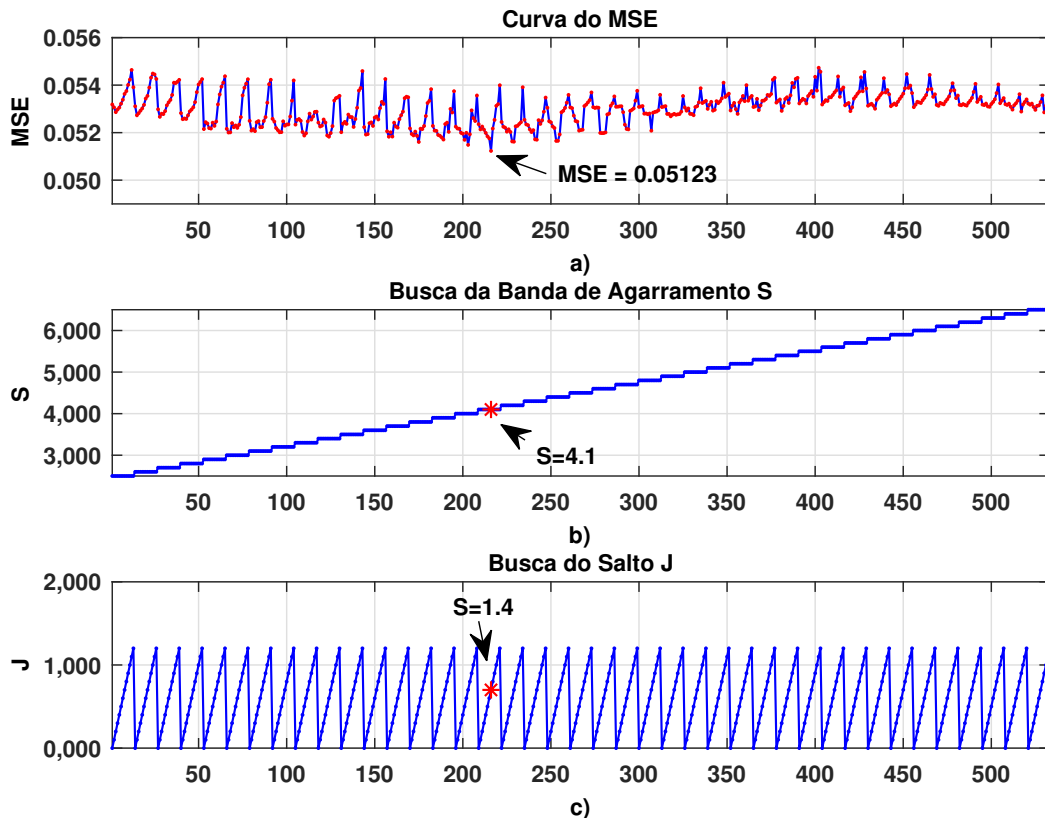


Conforme é mostrado na Figura 13, existe uma tendência da mediana se afastar do valor de S real com o aumento do valor da potência de ruído. Também é observado para os valores de maior potência do ruído, que ocorre um aumento na dispersão dos resultados da quantificação da banda de agarramento.

Logo, através dos resultados obtidos e mostrados na Figura 13, é possível concluir que o aumento dos valores da potência de ruído, podem aumentar os valores do erro na quantificação da banda morta mais banda de agarramento.

Na Figura 14 são mostrados os valores dos resultados obtidos através do algoritmo de busca em grade com o valor de banda morta mais banda de agarramento $S = 3$ e valor da potência de ruído $P_r = 0.03$. Na quantificação do atrito, o menor valor do erro obtido na curva do erro foi $MSE = 0.05123$, com valores da banda morta mais banda de agarramento $S = 4.1$ e salto $J = 1.4$.

Figura 14 – Resultado da busca em grade na quantificação da banda morta mais banda de agarramento com $S = 3$ e potência de ruído $P_r = 0.03$.

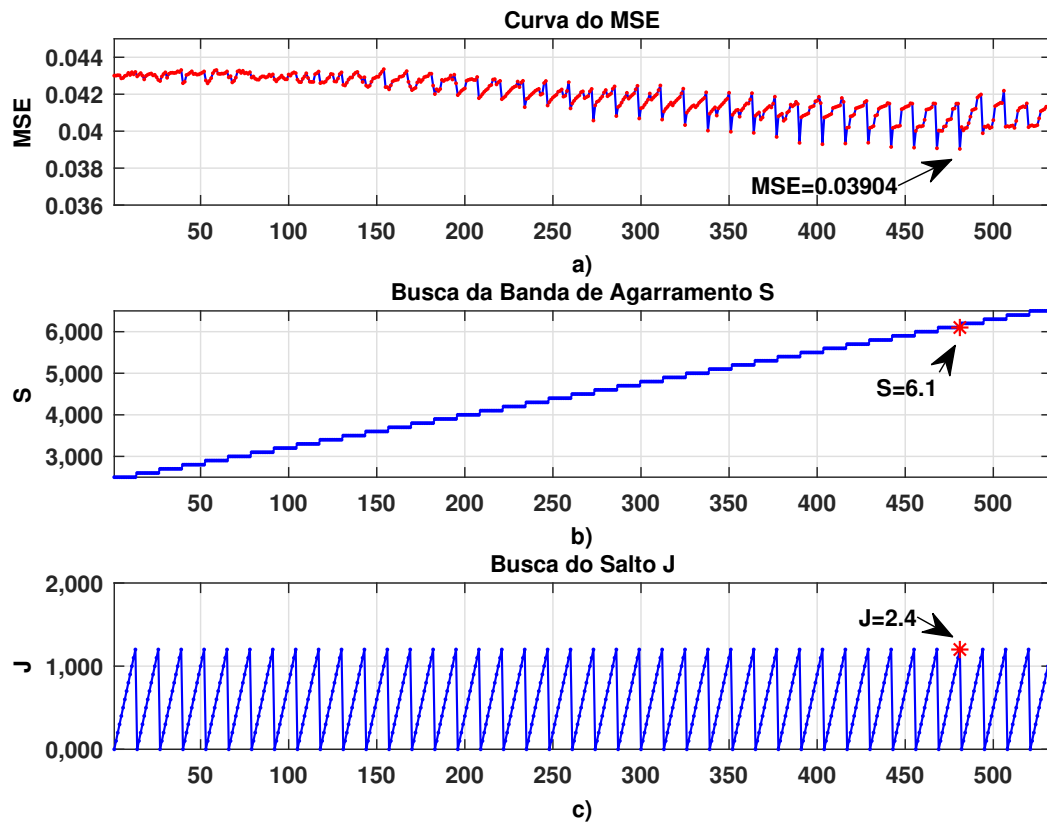


É possível observar através dos resultados mostrados na Figura 14 que o comportamento obtido da curva do erro MSE, possui vários valores de mínimos locais entre o intervalo de banda morta mais banda de agarramento $S = 3.0$ e $S = 5.5$, que podem ter aparecido na estimativa S (banda morta mais banda de agarramento) com o aumento da potência de ruído.

Os diversos valores de mínimos locais observados na Figura 14 com valores de amplitude próximas, podem gerar erros nos resultados da quantificação da banda morta mais banda de agarramento S , e assim explicar o motivo para o aumento da dispersão mostrada na Figura 13 ao realizar a busca de $S = 3$ com potência de ruído de 0.003.

Na Figura 15 são mostrados os valores dos resultados obtidos pelo algoritmo de busca em grade com banda morta mais banda de agarramento $S = 6$ e valor de potência de ruído $P_r = 0.03$. O valor obtido do menor erro foi $MSE = 0.03904$, com o valor de banda morta mais banda de agarramento $S = 6.1$ e salto $J = 2.4$.

Figura 15 – Resultado da busca em grade na quantificação da banda morta mais banda de agarramento com $S = 6$ e $P_r = 0.03$.



Na Figura 15 é observado que a curva obtida do erro MSE possui vários valores de mínimos locais entre o intervalo de banda morta mais banda de agarramento $S = 4.5$ e $S = 6.5$ que também podem ter aparecido na curva do gráfico MSE devido ao aumento da potência de ruído.

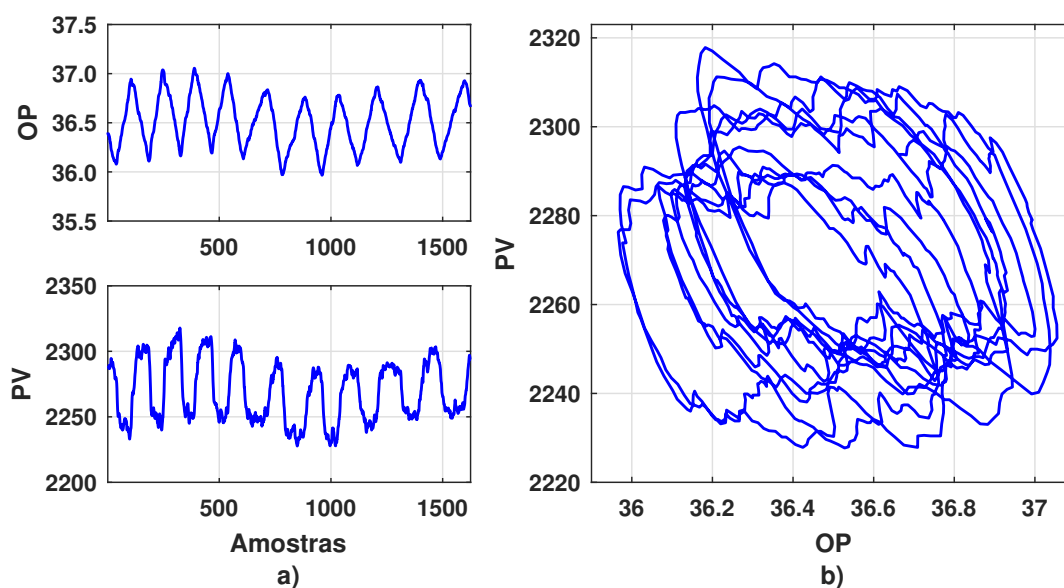
No resultado apresentado é possível observar através do comportamento da curva do erro MSE um pequeno intervalo contendo diversos valores de mínimos locais. Esses valores de mínimos locais explicam a ocorrência do aumento da dispersão mostrada na Figura 13, na busca de banda morta mais banda de agarramento para $S = 6$ e com valor de potência de ruído de 0.003.

2.6 Aplicação do método de quantificação de atrito em dados reais

Na Seção 2.5 a metodologia de quantificação do atrito foi aplicada em conjuntos de dados gerados através de simulações. Nesta seção, é pretendido aplicar a metodologia de quantificação de atrito em um conjunto de dados coletados de uma válvula com atrito de uma malha de controle de vazão de líquido de um processo industrial real mostrado em Ordys Damien Uduehi (2007).

O conjunto de dados é composto com 1625 amostras das variáveis de processo OP e PV ambos com taxa de 1 amostra por segundo. Para realizar a quantificação o conjunto de dados foi subdividido em 10 partes de 550 amostras, com janela de 100 amostras. Os parâmetros utilizados no algoritmo de busca em grade foram: banda de agarramento $S = \{0.30, 0.35, \dots, 0.75, 0.8\}$ e salto $J = \{0, 0.05, \dots, 0.95, 1\}$, ambos com passo $p = 0.05$. Na Figura 16 é mostrado o conjunto de dados das variáveis que serão utilizadas na quantificação do atrito.

Figura 16 – Dados de uma válvula de controle de vazão. a) Variáveis OP e PV no domínio do tempo. b) Gráfico ($OP \times PV$).



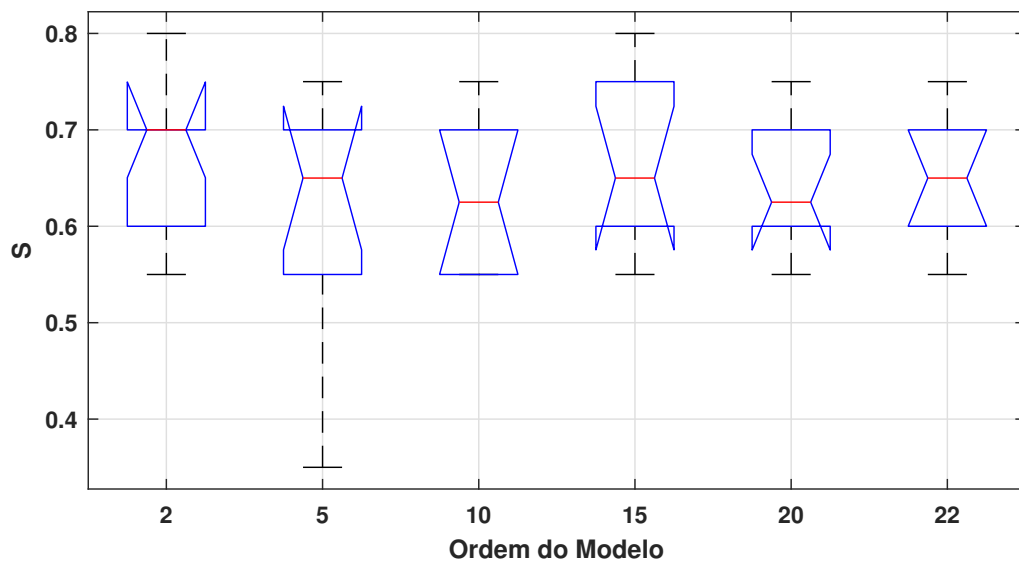
Na Figura 16 a) é apresentado o comportamento das variáveis de entrada do processo OP e de saída do processo PV no domínio do tempo. Na Figura 16 b) é apresentado o gráfico das variáveis do processo ($OP \times PV$). Na Figura 16 b) é mostrado através do gráfico ($OP \times PV$), características típicas de uma válvula sob ação do atrito, onde é possível observar um aumento da amplitude da variável de entrada OP , enquanto a variável de saída PV permanece com amplitude praticamente inalterada. Logo após a variável de entrada alcançar um determinado valor, a variável de saída altera a sua posição e permanece assim até ocorrer uma inversão no sentido de sua direção.

A quantificação dos dados industriais mostrados na Figura 16 foi realizada por diferentes autores e os resultados foram reunidos e apresentados em Jelali e Huang (2009). Lee utilizando o método baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* obteve banda de agarramento $S = 0.39$ e salto $J = 0.04$. Karra and Karim utilizaram o método baseado na identificação do modelo de *Hammerstein* e obtiveram os valores $S = 0.5$ e $J = 0.5$ e Choudhury utilizando *bicoherence* e ajuste da elipse obteve $S = 1.0$. Os resultados das quantificações apresentadas foram obtidas em Jelali e Huang (2009).

No presente trabalho para realizar a quantificação de S (banda morta mais banda de agarramento) e salto J , será utilizado o modelo de atrito de dois parâmetros de Choudhury com modelos de processo do tipo $ARX(N, N, 1)$ e $ARMAX(N, N, N, 1)$. Foi escolhido utilizar os dois modelos, porque o modelo do tipo ARX não permite modelar de forma independente a dinâmica do ruído e do processo, sendo mais adequado para os sinais que possuem somente ruído branco. O modelo do tipo $ARMAX$ possui o parâmetro C na sua estrutura permitindo modelar de forma independente as dinâmicas do processo e do ruído. Assim é proporcionado uma maior flexibilidade para o modelar o ruído, para os casos em que não estejam presente somente o ruído branco.

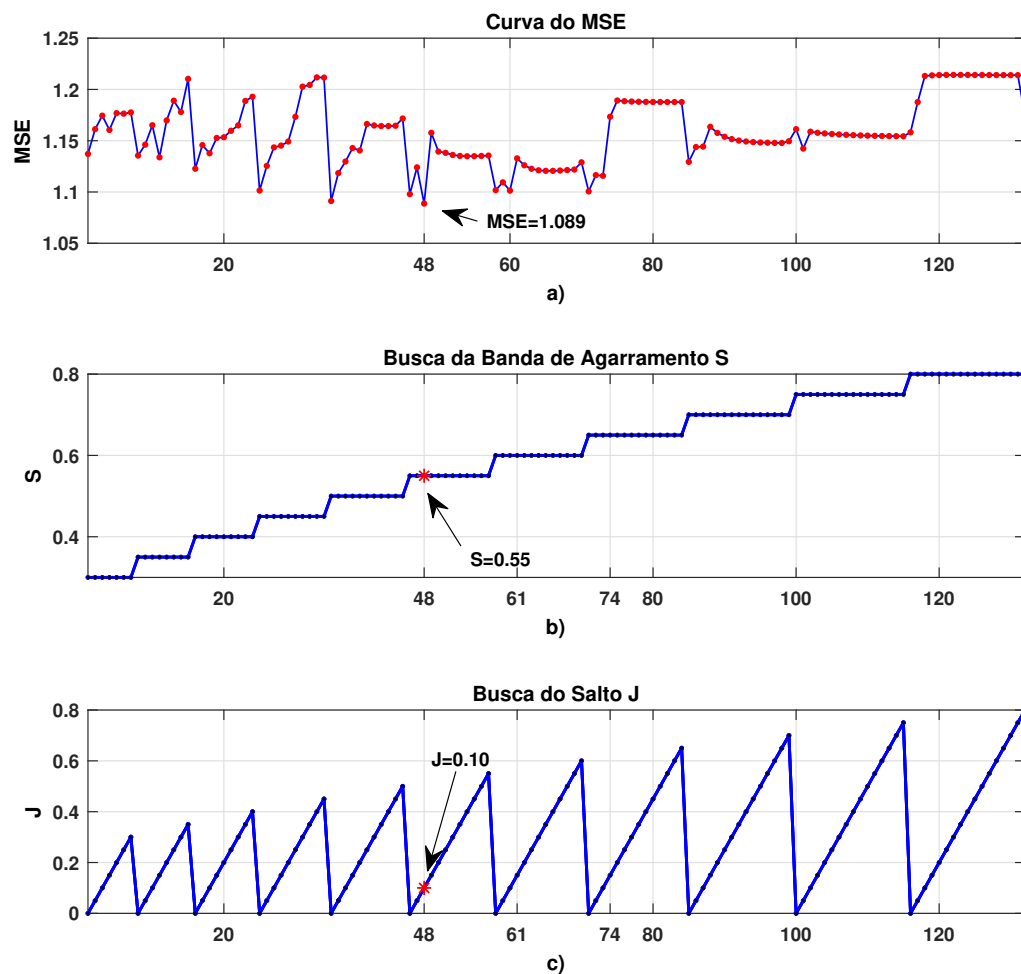
Devido não serem conhecidas as características do ruído presente no conjunto de dados que serão utilizados nesta seção, foram escolhidos para representar as dinâmicas da válvula e do processo os modelos lineares do tipo $ARX(N, N, 1)$ e $ARMAX(N, N, N, 1)$, ambos com o conjunto de ordem do modelo $N = \{2, 5, 10, 15, 20, 22\}$. Na Figura 17 estão apresentados os resultados obtidos na quantificação do atrito para os diferentes valores de ordem do modelo do processo do tipo ARX .

Figura 17 – Efeitos na quantificação de S , para variações na ordem do modelo ARX

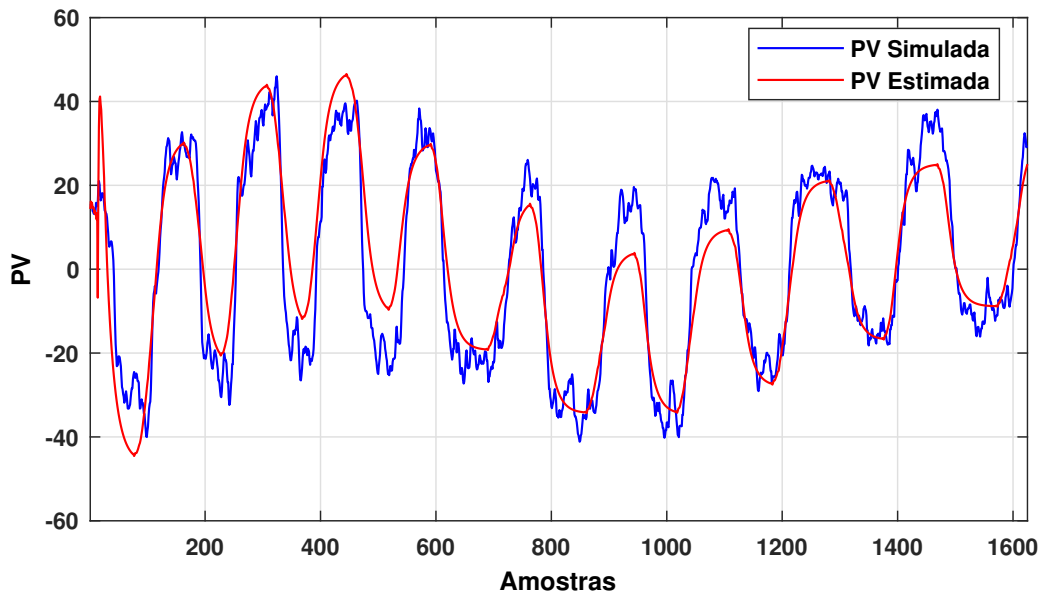


Os resultados apresentados na Figura 17 mostraram que a partir dos valores da ordem do modelo para $N = 5$ não é possível afirmar que os conjuntos de dados possuem medianas reais diferentes. Logo, o aumento da ordem do modelo para valores acima de $N = 5$ não apresentaram efeitos significativos na quantificação de S do atrito. Na Figura 18 são mostrados os resultados da busca em grade para S (banda morta mais banda de agarramento), salto J e erro MSE, obtidos a partir de um modelo do tipo ARX(15,15,1).

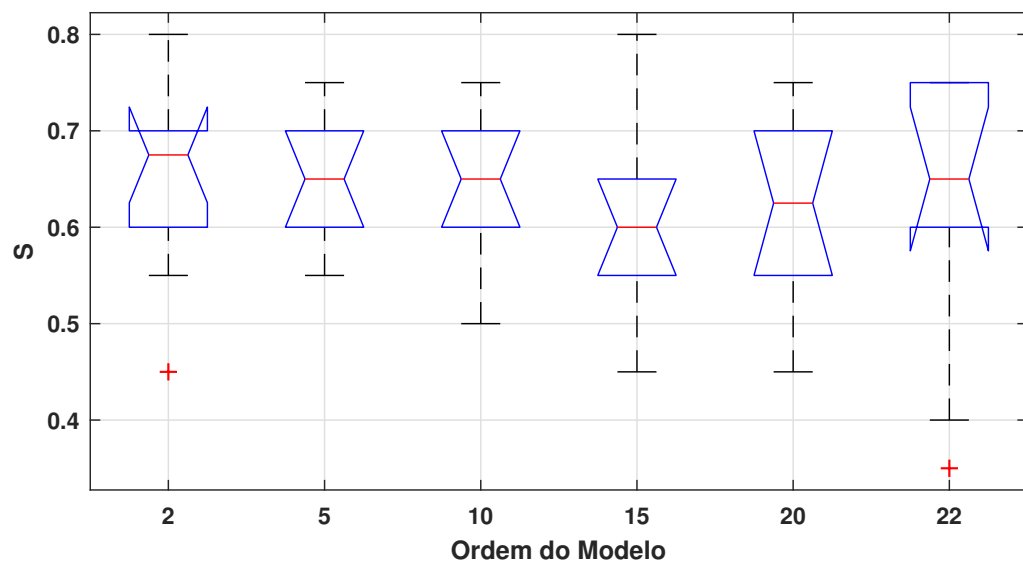
Figura 18 – Resultado da busca para o modelo de processo do tipo ARX(15,15,1).



Na Figura 18 os resultados da busca em grade para a ordem do modelo $N = 15$ foram $MSE = 1.089$, banda de agarramento $S = 0.55$ e salto $J = 0.10$. Os valores da banda de agarramento e do salto obtidos com o algoritmo de quantificação e modelo do tipo ARX não foram iguais aos mostrados em Jelali e Huang (2009). Entretanto, é mostrado através da Figura 19 o comportamento das variáveis de saída do processo PV simulada e PV estimada com os dados do algoritmo de quantificação, onde é possível observar que foi possível obter uma boa estimativa para a variável de saída PV .

Figura 19 – PV simulada e PV estimada para o modelo do tipo ARX(15,15,1).

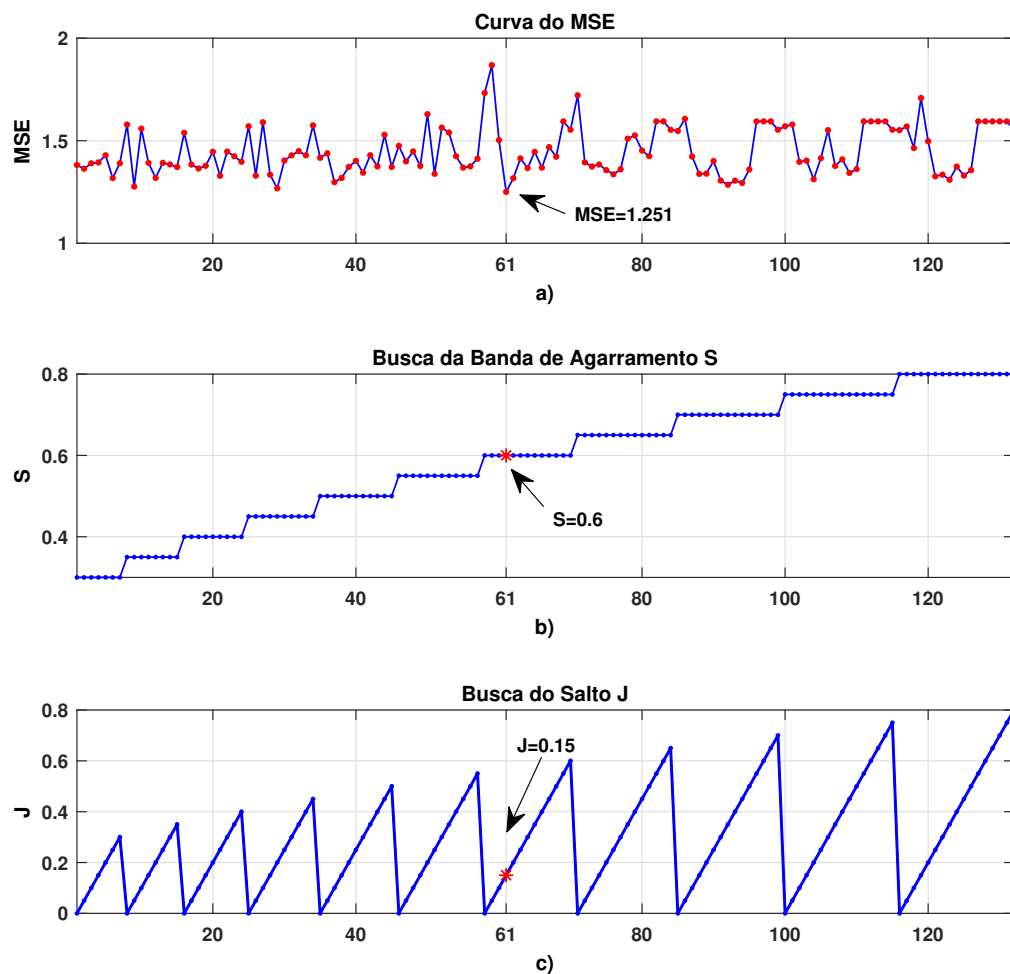
Na Figura 20, estão apresentados os resultados obtidos na quantificação da banda morta mais banda de agarramento para diferentes ordens do modelo de processo do tipo ARMAX.

Figura 20 – Efeitos na quantificação de S , para variações na ordem do modelo do processo do tipo do ARMAX

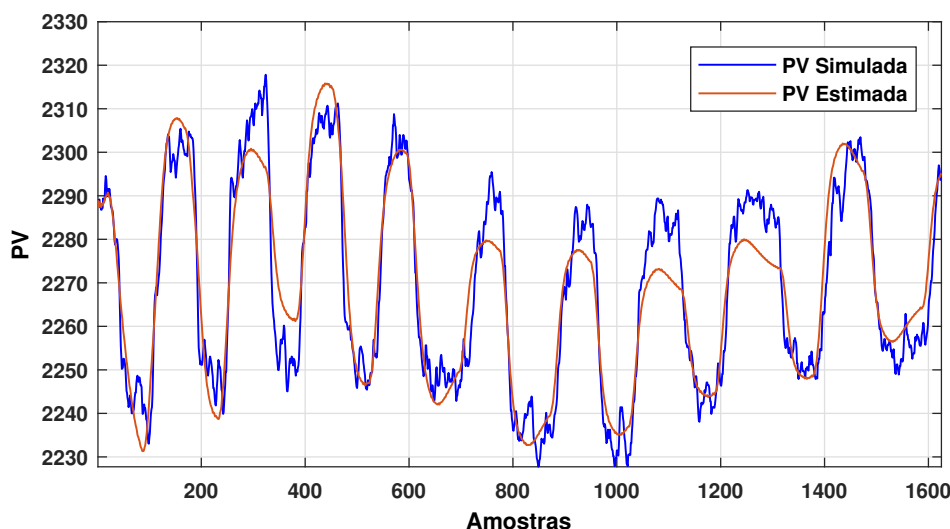
No gráfico da Figura 20 é mostrada a ocorrência de várias sobreposições entre os conjuntos de dados para as diferentes ordens do modelo. Esta ocorrência de sobreposição entre os conjuntos de dados, indicam que não é possível afirmar que os dados possuem

medianas reais diferentes. Logo, os resultados mostram que ocorre tanto para o modelo ARMAX (Figura 20) quanto para o modelo ARX (Figura 17), que o aumento da ordem do modelo não apresentou efeito significativo na quantificação do parâmetro S do atrito. Na Figura 21 são mostrados os resultados das buscas em grade para os valores de banda morta mais banda de agarramento S , salto J e erro MSE, obtidos a partir de um modelo do tipo ARMAX(15,15,15,1).

Figura 21 – Resultado da busca para o modelo de processo do tipo ARMAX(15,15,15,1).



Os resultados obtidos pelo algoritmo de busca em grade para a ordem do modelo $N = 15$ foram erro $MSE = 1.251$, banda morta mais banda de agarramento $S = 0.60$ e salto $J = 0.15$. Conforme concluído na Figura 20, mesmo que os resultados da quantificação com o modelo do tipo ARMAX(15,15,15,1) não são iguais aos resultados mostrados em Jelali e Huang (2009), é mostrado na Figura 22 que foi possível obter uma boa estimativa da variável de saída PV com os valores obtidos pelo algoritmo de quantificação.

Figura 22 – PV simulada e PV estimada para o modelo ARMAX(15,15,15,1).

2.7 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas diferentes métodos para realizar a quantificação de atrito baseado no modelo de *Hammerstein*, foram discutidos problemas abordados no processo da quantificação e as variações na técnica de quantificação baseada no modelo de *Hammerstein*. O método de quantificação também foi aplicado em um conjunto de dados de simulação e em um conjunto de dados de um processo real.

Quando o método foi aplicado aos dados de simulação, foram verificados os efeitos na quantificação da banda morta mais banda de agarramento S para variações no salto J , onde foi constatado que a variação no parâmetro do salto não afeta significativamente a quantificação da banda de agarramento. Foram verificados os efeitos na quantificação da banda morta mais banda de agarramento S para diferentes ordens do modelo com processos do tipo ARX. Os resultados mostraram que aumentar a ordem do modelo não apresentaram efeitos significativos na quantificação do atrito.

Foram verificados os efeitos nas alterações de diversos valores do parâmetro do ganho proporcional do controlador, onde foi evidenciado que aumentar o ganho proporcional afeta diretamente a quantificação da banda morta mais banda de agarramento. Por último foram verificados os efeitos na banda de agarramento, para variações na potência de ruído. Os resultados mostraram que ao aumentar a potência de ruído, existe uma tendência dos valores estimados se afastarem dos valores reais na quantificação do atrito.

Capítulo 3

Compensação de Atrito em Válvulas de Controle

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica dos métodos voltados à compensação de atrito em válvulas de controle. Dentre os métodos de compensação de atrito apresentados na revisão bibliográfica, serão melhor detalhados os métodos que adicionam uma sequência de pulsos com amplitude fixa na mesma direção da taxa de mudança do sinal de controle. Na sequência, mostra-se outro método de compensação de atrito, que adiciona uma sequência de pulsos ao sinal de controle, porém com amplitude variável dos pulsos. Neste método, a amplitude dos pulsos é modulada em função do erro da malha de controle.

Em seguida, discutem-se os princípios de funcionamento e as aplicações de alguns dos métodos apresentados, demonstrando através de simulações o comportamento dos métodos de compensação de atrito com amplitude dos pulsos fixa e com amplitude dos pulsos variável. Além de demonstrar os princípios de funcionamento e as aplicações dos compensadores, serão avaliados os efeitos provocados na compensação para diferentes escolhas dos ajustes dos parâmetros. Através dos resultados das simulações com os diferentes parâmetros, serão apresentadas e discutidas a escolha da utilização do compensador de atrito com amplitude variável ao invés do compensador com amplitude fixa.

Finalmente, apresentam-se as contribuições proporcionadas pelo método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos. Quando o método reduz a quantidade de movimento da válvula, de forma indireta reduz os desgastes dos seus componentes internos. A redução dos desgastes dos componentes da válvula contribui com o aumento do seu tempo de operação, mesmo que a válvula esteja com atrito. Por fim serão apresentados os comentários e as conclusões sobre os resultados deste capítulo.

3.2 Métodos de compensação de atrito

Segundo a literatura, as primeiras abordagens sobre compensadores de atrito, foram as estratégias de controle investigadas por Ehrich (1991) e aplicadas nos sistemas eletromecânicos. Anos depois, as técnicas *dithering* e *impulsive control*, ambas de Armstrong-Hélouvry, Dupont e Wit (1994) foram destaque na compensação de atrito em sistemas eletromecânicos. Entretanto, as duas técnicas de compensação apresentaram baixa eficiência quando foram aplicadas nas válvulas de controle. De acordo com Srinivasan et al. (2005) as válvulas de controle possuem uma dinâmica lenta e as duas técnicas de compensação apresentadas operam em altas frequências. Assim quando o método é aplicado em válvulas de controle, os atuadores das válvulas se comportaram como um filtro para ambos os métodos de compensação de atrito.

Armstrong e Wit (1996) apresentaram técnicas voltadas para a compensação de atrito em malhas de controle de posição e velocidade de máquinas rotativas. Os autores também propuseram a divisão das técnicas de compensação de atrito em duas categorias sendo elas: a categoria dos métodos baseadas em modelo e a categoria dos métodos não baseadas em modelo. Fazem parte da categoria dos métodos não baseadas em modelo as técnicas *dither* e o *impulsive control*, ambas de Armstrong-Hélouvry, Dupont e Wit (1994). Fazem parte da categoria dos métodos baseados em modelo as técnicas *fixed compensation* de Armstrong-Hélouvry, Dupont e Wit (1994), que propuseram um compensador que aplica uma força oposta igual à força instantânea do atrito, tendo como limitação o fato de somente poder ser usado quando o modelo de atrito é conhecido.

Em Kayihan e III (2000) foi proposto o método de compensação de atrito IOL (*input-output linearization*). O compensador utiliza como parâmetro para realizar a compensação de atrito os valores de posição e velocidade de deslocamento da haste da válvula. Os valores de posição e velocidade são obtidos através da realimentação não linear de estados ou instalação de sensores na válvula. A limitação do compensador IOL é devido ao fato do método de compensação utilizar os valores de posição e velocidade, além da dependência dos parâmetros intrínsecos da válvula: o valor do coeficiente de atrito, o valor da constante elástica da mola e o valor da massa das partes móveis da válvula.

Em Hägglund (2002) foi proposto o método de compensação de atrito, baseado na adição de pulsos regulares de baixa energia, na mesma direção do sinal de controle. A ideia por trás do método é que a válvula receba uma sequência de batidas curtas ou (*knocking*) até superar o atrito existente e iniciar o deslizamento. Logo, de acordo com a ideia proposta, o método foi chamado de compensador de atrito *knocker*. O *knocker* adiciona uma sequência de pulsos ao sinal de controle caracterizado por três parâmetros: a) a amplitude do pulso, b) a largura do pulso e c) o tempo entre os pulsos. Os parâmetros do *knocker* devem ser escolhidos de modo que a sequência de pulsos adicionados ao sinal de controle, sejam capazes de superar o atrito existente na válvula, e com isso a válvula

possa iniciar o seu curso de deslizamento. A sequência de pulsos que é adicionada pelo compensador *knocker* não deve provocar deslizamentos extras na válvula de controle. Em Srinivasan e Rengaswamy (2005) os autores propuseram recomendações técnicas para realizar a sintonia dos parâmetros do compensador *knocker*, relacionado com os valores obtidos na quantificação de atrito.

Em Hägglund (2007) é apresentado um método para realizar a compensação da banda morta através de uma técnica, onde é aplicado uma variação súbita no sinal de controle a cada mudança ocorrida no sinal de controle. O autor indica que a presença da banda morta na válvula de controle provoca atrasos, que contribuem para deteriorar a malha de controle. Um método similar ao proposto por Hägglund (2007) foi o método proposto por Ivan e Lakshminarayanan (2009). O método proposto consiste em realizar a compensação da banda morta através de uma variação no sinal de controle, porém baseada no valor do atrito existente na válvula.

Em Ivan e Lakshminarayanan (2009), foi proposto o método de compensação de atrito RC (*constant reinforcement*) ou compensador de reforço constante e tem o seu princípio de funcionamento semelhante ao compensador *knocker*. A diferença entre os métodos é que o compensador RC adiciona um valor constante k na mesma direção do sinal de controle da válvula. O autor sugere que o valor de reforço a ser adicionado ao sinal de controle tenha o mesmo valor do atrito existente na válvula. O autor sugere que esse valor é suficiente para o compensador operar de forma agressiva e superar o atrito o mais rápido o possível, ou seja, logo após o compensador entrar em operação.

Os compensadores citados nos parágrafos anteriores foram capazes de reduzir o erro e a amplitude das oscilações nas malhas de controle. Porém ao custo de um maior desgaste e redução da vida útil da válvula, promovidos pelo excesso de movimento e reversões. Com o propósito de reduzir as reversões e o excesso de movimento da válvula, foi proposto por Srinivasan e Rengaswamy (2008) o método de compensação de atrito *two-move*. O princípio de funcionamento do método, consiste em realizar a compensação de atrito com dois movimentos sendo: o primeiro movimento é dado para tirar a válvula da posição agarrada e o segundo movimento é dado para levar a variável de saída do processo para a valor de amplitude desejada.

Cuadros (2011) apresentou três métodos baseados na adição de pulsos ao sinal de controle tendo como um dos seus objetivos, o de minimizar a problemática de reversões e excesso de movimento da válvula. O primeiro método foi uma melhoria no compensador *two-move*. O problema do método é que para reduzir o erro em regime é necessário o conhecimento do valor do sinal de controle o que torna a implementação do método um inconveniente. O segundo método desenvolvido consiste em manter movimentos suaves na abertura e no fechamento da válvula para reduzir até próximo de zero o erro em estado estacionário. Para alcançar esse objetivo é aplicado um sinal suave contrário ao movimento

da válvula até que seja reduzido o erro em regime. O terceiro método proposto foi parar os pulsos do compensador *knocker* quando a derivada do erro fosse menor do que um limiar previamente especificado. Os resultados obtidos pelo terceiro método reduziram a abertura e o fechamento da válvula, o que contribui com o aumento na vida útil da válvula.

Arifin et al. (2014) propuseram uma variação do compensador *knocker* com amplitude variável dos pulsos para compensar o atrito. O método assume que o aumento da amplitude dos pulsos de compensação é inversamente proporcional ao erro. Porém, durante o aumento da amplitude dos pulsos do compensador, ocorre um aumento no sinal do erro e com isso não ocorre convergência enquanto não é cessado os pulsos, que acontece quando a amplitude do pulso for equivalente à metade do valor da amplitude do atrito.

3.3 Métodos de compensação de atrito com amplitude fixa

O objetivo desta seção é demonstrar através de simulação o princípio de funcionamento de alguns métodos de compensação de atrito apresentados na revisão bibliográfica da Seção 3.2. Dentre os métodos apresentados na revisão bibliográfica, foram escolhidos para serem abordados nas demonstrações deste trabalho os métodos de compensação *knocker* de Hägglund (2002) e reforço constante de Ivan e Lakshminarayanan (2009).

A escolha destes dois métodos foi baseada nas principais características apresentadas em Cuadros (2011). As características observadas nos métodos de compensação pelo autor foram: melhoria no desempenho da variável de saída do processo, redução da variabilidade dos movimentos na haste da válvula, necessidade de informações adicionais para realizar a implementação, capacidade de tratamento de distúrbios e mudanças na referência de entrada do processo.

Segundo Cuadros (2011), todos os métodos de compensação avaliados foram capazes de proporcionar uma melhoria significativa no desempenho da variável de saída do processo. Entretanto, somente os métodos de compensação *knocker* e reforço constante utilizam em sua implementação o valor do atrito a ser superado pelo compensador, o que torna o método mais simples e fácil de ser implementado.

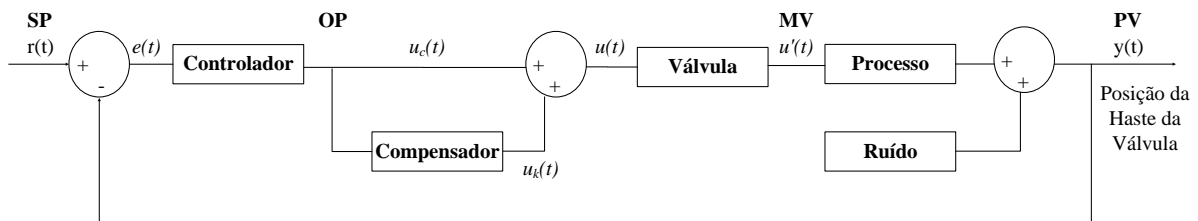
Uma característica comum entre os métodos escolhidos é que ambos operam com amplitude fixa. O princípio de funcionamento dos métodos de compensação com amplitude fixa, baseia-se na ideia de fornecer uma pequena quantidade de energia a ser adicionada ao sinal de controle, de maneira que essa energia seja suficiente para superar o atrito existente sem provocar deslizamentos extras na válvula de controle.

3.4 Aplicação dos métodos de compensação de atrito com amplitude fixa em casos de simulação

3.4.1 Diagrama de blocos utilizado nas simulações

O diagrama de blocos mostrado na Figura 23, será utilizado nas simulações com os compensadores de atrito de amplitude fixa.

Figura 23 – Diagrama de blocos generalizado para os compensadores de atrito, baseados na adição de pulsos ao sinal de controle, com amplitude fixa dos pulsos.



No diagrama $e(t)$ é o sinal do erro resultante da diferença entre o sinal de referência de entrada do processo $r(t)$ e o sinal de realimentação de saída do processo $y(t)$. O sinal $u_c(t)$ é a saída do controlador proporcional integral PI definido pela função de transferência mostrada na Equação 3.1.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + K_i \frac{1}{s} \right) \quad (3.1)$$

Os parâmetros da sintonia do controlador são: ganho proporcional $k_c = 8.0$ e ganho integral $k_i = 0.1$. No diagrama, o bloco processo representa o comportamento da dinâmica do processo definido pela função de transferência de primeira ordem mostrada na Equação 3.2.

$$G_p(s) = \frac{1}{(25S + 1)} \quad (3.2)$$

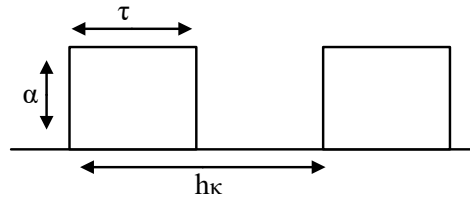
O bloco válvula representa o modelo do comportamento de uma válvula de controle com atrito, utilizando o modelo de atrito de dois parâmetros com ($S = 3\%$ e $J = 1\%$) de Choudhury. Por fim, o bloco que representa o ruído produz uma sequência aleatória com densidade espectral de potência de amplitude 0.001.

3.4.2 O compensador de atrito *knocker*

O compensador de atrito *knocker* foi proposto por Hägglund (2002), e possui a finalidade de realizar a compensação de atrito estático em válvulas de controle. O princípio de funcionamento do compensador de atrito *knocker*, consiste em adicionar na mesma direção do sinal de controle uma sequência de pulsos regulares de baixa energia e com amplitude e intervalo de tempo dos pulsos fixo.

Os pulsos do compensador de atrito *knocker* são caracterizados pelos seguintes parâmetros: amplitude do pulso (α); largura do pulso (τ) e tempo entre os pulsos (h_k). Estes três parâmetros definem as características da sequência dos pulsos adicionadas ao sinal de controle pelo compensador. Na Figura 24 é mostrado os parâmetros dos pulsos do compensador de atrito *knocker*.

Figura 24 – Parâmetros do pulso do compensador de atrito *knocker*.



A equação resultante da adição dos pulsos do compensador *knocker* ao sinal de controle é mostrado na Equação 3.3.

$$u(t) = u_c(t) + u_k(t), \quad (3.3)$$

onde $u_k(t)$ é o sinal de saída do compensador de atrito *knocker* definido na Equação 3.4.

$$u_k(t) = \begin{cases} \alpha \cdot \text{sign}(u_c(t) - u_c(t_p)), & \text{se } t \leq t_p + h_k + \tau \\ 0, & \text{se } t > t_p + h_k + \tau, \end{cases} \quad (3.4)$$

onde t_p é o instante de tempo de início do pulso anterior. Assim, o sinal obtido para cada pulso é determinado pela mudança na direção do sinal de controle $u_c(t)$.

3.4.2.1 Ajuste dos parâmetros do compensador

De acordo com a Seção 3.4.2 os pulsos do compensador *knocker* são definidos basicamente por três parâmetros: a amplitude dos pulsos α , a largura dos pulsos τ e o tempo entre os pulsos h_k , sendo estes parâmetros que determinam o período dos pulsos e a energia que será adicionada ao sinal de controle.

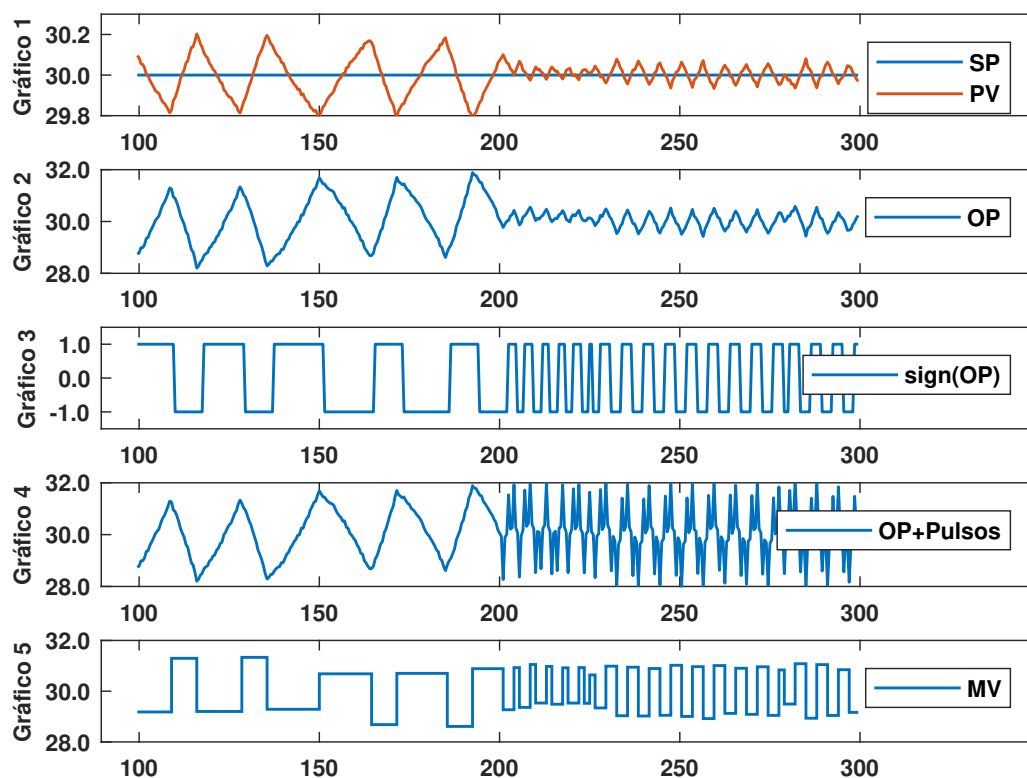
Segundo Hägglund (2002) e Srinivasan et al. (2005) os ajustes dos parâmetros dos pulsos do compensador *knocker* deverão atender as seguintes recomendações: a amplitude dos pulsos α deverá ser ajustada no intervalo entre 1% a 4% do valor da faixa do sinal de controle, a largura dos pulsos τ não deve ser menor que o tempo de amostragem T_s do sistema e recomenda o ajuste no intervalo entre $1T_s$ a $2T_s$ e o tempo entre os pulsos h_k deve ser maior do que a largura dos pulsos τ e maior do que o tempo de amostragem T_s e recomenda que o parâmetro seja ajustado no intervalo entre $3T_s$ a $5T_s$.

Atendendo as recomendações propostas por Hägglund (2002) e Srinivasan et al. (2005) para realizar os ajustes dos parâmetros do compensador *knocker*, os parâmetros foram ajustados com a amplitude dos pulsos $\alpha=0.5S$, largura dos pulsos $\tau=1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k=3T_s$.

Com a finalidade de observar o comportamento do compensador após os parâmetros serem ajustados, foi realizada uma simulação com o diagrama de blocos da Figura 23. Na referência de entrada, foi utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude $r(t)=30$, tempo de amostragem $T_s=1$ e duração da simulação de 500 s.

A simulação foi iniciada sob ação de um controlador PI e após o instante de 200 s o compensador *knocker* entrou em operação, operando em conjunto com o controlador PI até o término da simulação. Os resultados da simulação com os parâmetros do compensador ajustados são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Simulação com o controlador PI até o instante de 200 s e ação do controlador PI mais o compensador *knocker* após o instante de 200 s.



No gráfico 1 da Figura 25 é mostrado que após a entrada do compensador *knocker* em operação a amplitude das oscilações na variável de saída $y(t)$ foram reduzidas, entretanto, ocorreu um aumento da frequência de oscilação. De acordo com Cuadros (2011), mesmo que a amplitude da variável de saída $y(t)$ tenha sido reduzida, a ação integral do controlador PI

mantém as oscilações com menor amplitude. O gráfico 2 mostra que após o compensador *knocker* entrar em operação, o sinal de controle $u_c(t)$ reduziu sua amplitude, porém ocorreu um aumento em sua frequência de oscilação.

No gráfico 3 ocorreu um aumento na variação do sinal de controle $u_c(t)$ após o instante de 200 s. No gráfico 4 é mostrado que os pulsos do compensador estão sendo adicionados na mesma direção do sinal de controle $u_c(t)$. O gráfico 5 mostra um aumento na frequência de oscilação da variável $u'(t)$. Esse aumento na variável $u'(t)$ indica que após o compensador *knocker* entrar em operação aumentou a quantidade de movimento de abertura e fechamento realizado pela válvula.

3.4.2.2 Efeitos da amplitude dos pulsos do compensador

O objetivo desta seção é avaliar através de simulação os efeitos da amplitude dos pulsos do *knocker* na compensação de atrito. Os efeitos serão avaliados variando a amplitude dos pulsos do *knocker* e observando os efeitos sobre o critério da integral do erro absoluto (*Integral Absolute Error-IAE*) e sobre a quantidade de movimento QM realizado pela válvula. O índice IAE permite avaliar o desempenho da malha através do erro $e(t)$. Logo é possível identificar os valores de amplitude que afetaram o erro de forma positiva ou negativa. A equação que define o índice IAE é mostrada na Equação 3.5.

$$IAE = \sum_{t=1}^n |e(t)|, \quad (3.5)$$

onde o sinal $|e(t)|$ é o valor absoluto do erro obtido através da diferença entre o sinal $r(t)$ e a realimentação do sinal de saída $y(t)$. O índice QM permite avaliar as variações ocorridas na válvula de controle e a frequência com que as oscilações ocorrem. Com base no índice QM é possível associar o excesso de movimento da haste da válvula ao desgaste prematuro dos componentes internos da válvula de controle. A equação que define os valores da quantidade de movimento para o índice QM na válvula é mostrado na Equação 3.6.

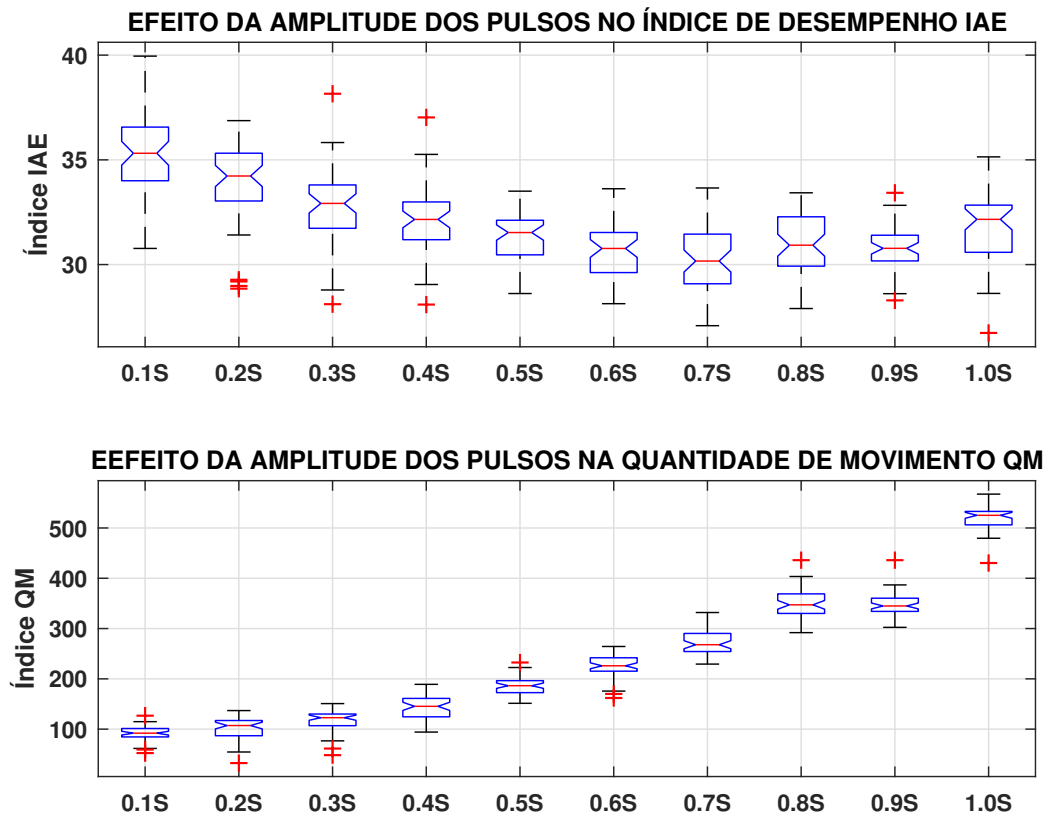
$$QM = \sum_{t=1}^n |x(t) - x(t-1)|, \quad (3.6)$$

onde os sinais $x(t)$ e $x(t-1)$ são as posições da haste da válvula no instante atual e no instante de tempo anterior. Para avaliar os efeitos da amplitude dos pulsos do compensador *knocker*, simulações foram realizadas utilizando o diagrama da Figura 23 com referência de entrada $r(t)=30$, tempo de amostragem $T_s=1$ e tempo de simulação de 500 s.

O compensador foi ajustado com amplitude dos pulsos $\alpha=S$, largura dos pulsos $\tau=1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k=3T_s$. As simulações foram iniciadas sob ação do controlador PI e após 200 s o compensador *knocker* entrou em operação. Os índices IAE e QM foram calculados no intervalo de operação do compensador *knocker* entre 200 a

500 s. Foi variada a amplitude dos pulsos para os valores entre $(0.1S, 0.2S, \dots, 0.9S, 1.0S)$ repetindo cinquenta vezes para cada valor de amplitude. A Figura 26 mostra os resultados da simulação antes e após o compensador de atrito entrar em operação.

Figura 26 – Efeito da amplitude do pulso no critério de desempenho IAE e na quantidade de movimento QM na válvula de controle.



Na Figura 26 o índice IAE apresentou um valor de mediana alta para a amplitude de pulsos de $0.1S$ e foi reduzindo os valores da mediana até o valor de amplitude do pulso de $0.6S$. Portanto, o índice IAE é inversamente proporcional ao aumento da amplitude de pulsos até $0.6S$. A partir dos valores de amplitude dos pulsos maiores que $0.6S$ o índice IAE é pouco afetado, pois de acordo com o gráfico os valores da mediana se mantêm quase constante.

O gráfico do índice QM mostra que para os valores de amplitude de pulso entre $0.1S$ e $0.4S$ a amplitude do pulso produz pouco efeito sobre QM , pois os valores da mediana são levemente alterados. A partir do valor de amplitude do pulso de $0.4S$, a quantidade de movimento é afetada significativamente, pois de acordo com o aumento da amplitude dos pulsos, o valor da mediana é alterada significativamente.

3.4.3 O compensador de atrito reforço constante RC

O compensador de atrito reforço constante foi proposto por Ivan e Lakshminarayanan (2009), e possui a finalidade de realizar a compensação de atrito em válvulas de controle. O princípio de funcionamento do compensador reforço constante é semelhante ao compensador de atrito *knocker*. A diferença entre os métodos é que o compensador *knocker* adiciona uma sequência de pulsos regulares ao sinal de controle, enquanto o compensador reforço constante adiciona um valor constante de reforço k ao sinal de controle $u_c(t)$. A equação resultante da adição do sinal $u_k(t)$ do compensador reforço constante ao sinal $u_c(t)$ é mostrado na Equação 3.3. O sinal $u_k(t)$ do compensador reforço constante é mostrado na Equação 3.7.

$$u_k(t) = k \cdot \text{sign}(u_c(t) - u_c(t_p)), \quad (3.7)$$

onde k é o valor de reforço constante a ser adicionado ao sinal de controle e t_p é o instante de tempo de início do pulso anterior. Assim, o sinal obtido para cada pulso é determinado pela mudança na direção do sinal de controle $u_c(t)$.

3.4.3.1 Ajuste dos parâmetros do compensador

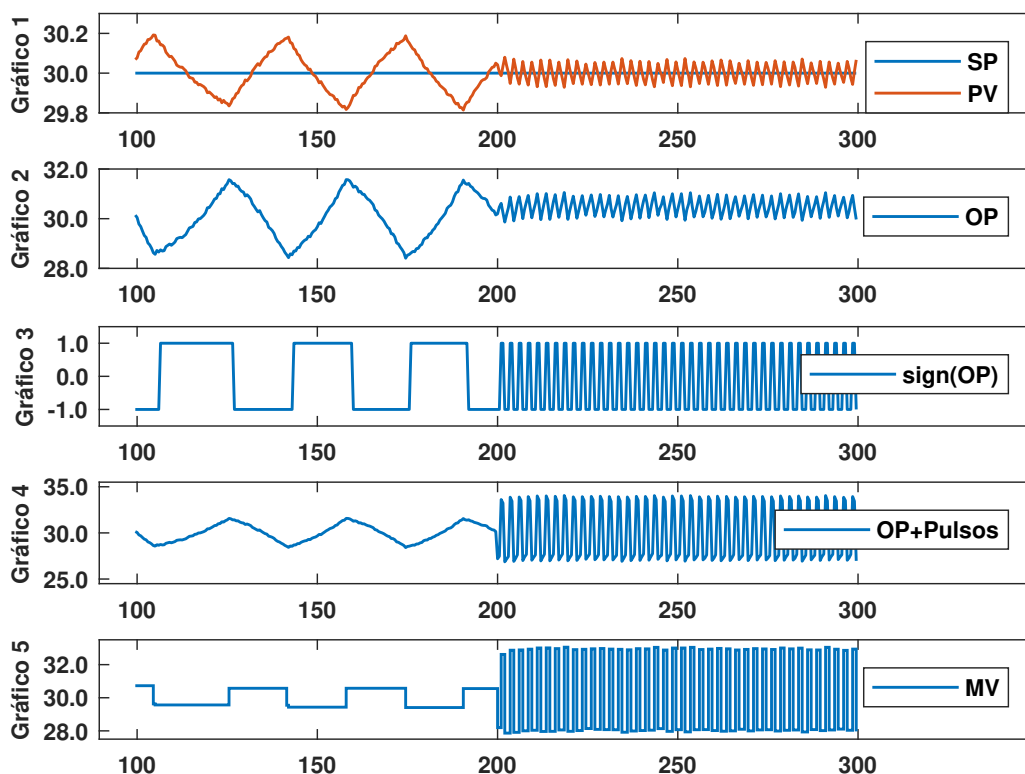
O ajuste do parâmetro de reforço k do compensador de atrito reforço constante foi realizado baseado nas recomendações propostas por Ivan e Lakshminarayanan (2009). Segundo o autor, o ajuste do compensador é realizado para que o parâmetro k funcione como um reforço para adicionar ao sinal de controle.

Em Ivan e Lakshminarayanan (2009), é recomendado que o valor do parâmetro k seja igual ao valor atrito da válvula de controle. Segundo o autor o menor valor de reforço que deve ser adicionado ao sinal de controle para superar o atrito na válvula é um reforço igual ao valor do atrito. Assim é esperado que seja possível tornar o compensador de atrito mais agressivo, logo nas primeiras atuações do compensador na válvula de controle com atrito, objetivando assim conseguir o mais rápido possível a redução das oscilações na variável de saída do processo $y(t)$.

Após o ajuste do parâmetro de reforço k ter sido realizado no compensador de atrito reforço constante, com mesmo valor do atrito na válvula, foi realizada uma simulação utilizando o diagrama de blocos da Figura 23, com referência de entrada um sinal do tipo degrau com amplitude de $r(t) = 30$, tempo de amostragem de $T_s = 1$ e tempo total de simulação de 500 s.

O compensador de atrito reforço constante foi programado para entrar em operação no instante de 200 s e permanecer até o final da simulação operando em conjunto com o controlador PI. Os resultados antes e após o compensador reforço constante entrar em operação são mostrados na Figura 27.

Figura 27 – Simulação utilizando o controlador PI até o instante de 200 s e ação do controlador PI mais o compensador RC após 200 s.



A simulação foi iniciada sob ação do controlador PI até o instante de 200 s e após o instante de tempo de 200 s o compensador reforço constante entrou em operação em conjunto com o controlador PI até o término da simulação. O gráfico 1 da Figura 27 mostra que ocorreu uma redução na amplitude das oscilações na variável $y(t)$. Entretanto, após a entrada do compensador reforço constante em operação, ocorreu um aumento na frequência de oscilação na variável de saída do processo $y(t)$.

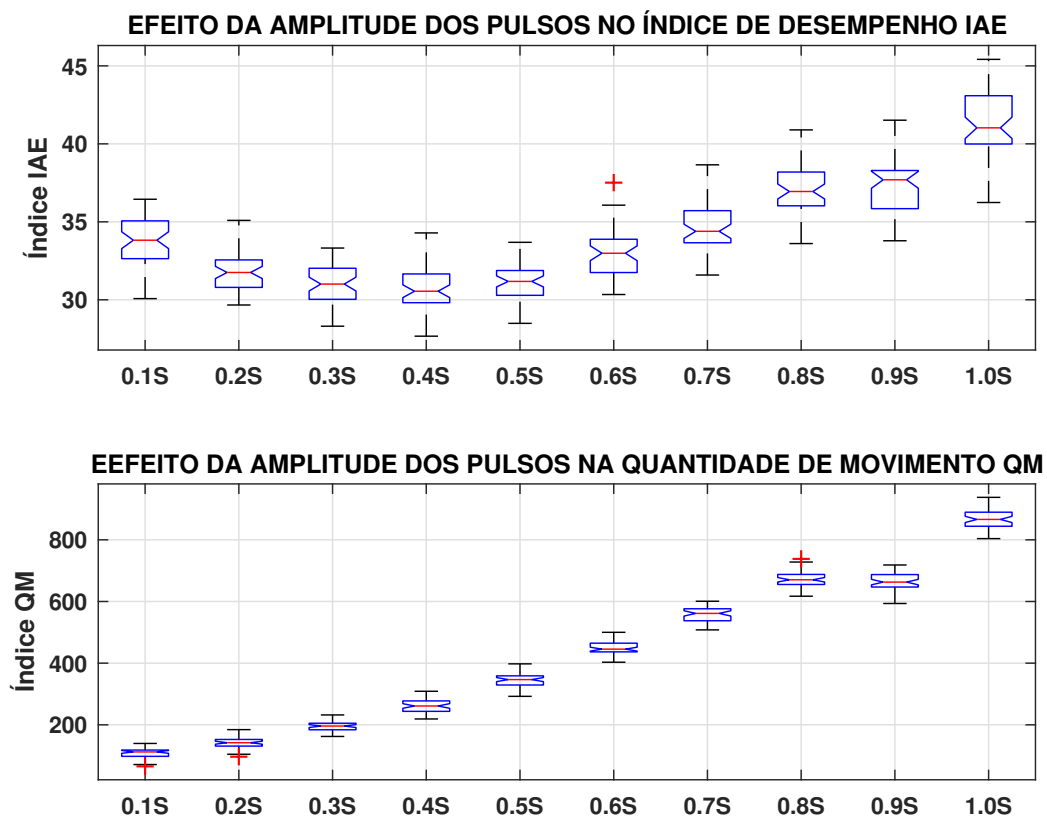
Os gráficos 2,3 e 4 também mostraram que após a entrada do compensador reforço constante em operação, ocorreu um aumento na frequência de oscilação em seus respectivos sinais. No gráfico 5 ocorreu um aumento significativo na frequência de oscilação da variável MV quando comparado ao resultado da mesma variável sob ação do compensador *knocker* mostrado no gráfico 5 da Figura 25. O aumento da frequência de oscilação da variável MV é uma desvantagem, pois é um indicativo que ocorreu um aumento na quantidade de movimento, podendo assim contribuir para reduzir a vida útil da válvula.

3.4.3.2 Efeitos da amplitude dos pulsos do compensador

O objetivo desta seção é avaliar através de simulação os efeitos de diferentes escolhas de valores do parâmetro de reforço k . Os efeitos serão avaliados variando os valores do parâmetro k do compensador e observando os efeitos provocados nos índices IAE e QM . As simulações serão realizadas utilizando o diagrama de blocos apresentado na Figura 23. Na referência de entrada será utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude $y(t)=30$, tempo de amostragem $T_s=1$ e tempo de simulação de 500 s.

A simulação será iniciada sob ação do controlador PI e logo após o instante de 200 s o compensador reforço constante entra em operação. A partir do instante de 200 s o compensador reforço constante e o controlador PI estarão operando em conjunto na malha de controle. Os cálculos dos índices IAE e QM serão realizados no intervalo de tempo entre (200-500 s), pois é o intervalo em que o compensador reforço constante está em operação. Será variado o valor do parâmetro de reforço k como fração da banda de agarramento S para os valores (0.1S, 0.2S, ..., 0.9S, 1.0S) repetindo cinquenta vezes para cada valor de amplitude dos pulsos. Os resultados obtidos antes e após o compensador entrar em operação (200 s) são mostrados na Figura 28.

Figura 28 – Efeito de diferentes escolhas do parâmetro k no critério de desempenho IAE e na quantidade de movimento QM na válvula de controle.



Na Figura 28 o índice IAE é iniciado com valor de mediana baixa para amplitude do sinal de reforço de $0.1S$ e continua reduzindo até o valor de $0.4S$. É observado que para valores de reforço k superior a $0.4S$ existe uma tendência de aumento da mediana, ou seja, o índice IAE é proporcional ao aumento destes valores de amplitude dos pulsos.

O gráfico do índice QM mostra que para a amplitude dos pulsos $0.1S$ o índice QM é pouco afetado, pois o valor da mediana é bem baixo e possui uma leve tendência até o valor de amplitude do pulso de $0.3S$. De acordo com os resultados de QM os valores da mediana do índice QM é fortemente afetada de forma proporcional ao aumento dos valores da amplitude dos pulsos acima de $0.4S$.

3.5 Método de compensação de atrito com amplitude variável

3.5.1 Descrição do método

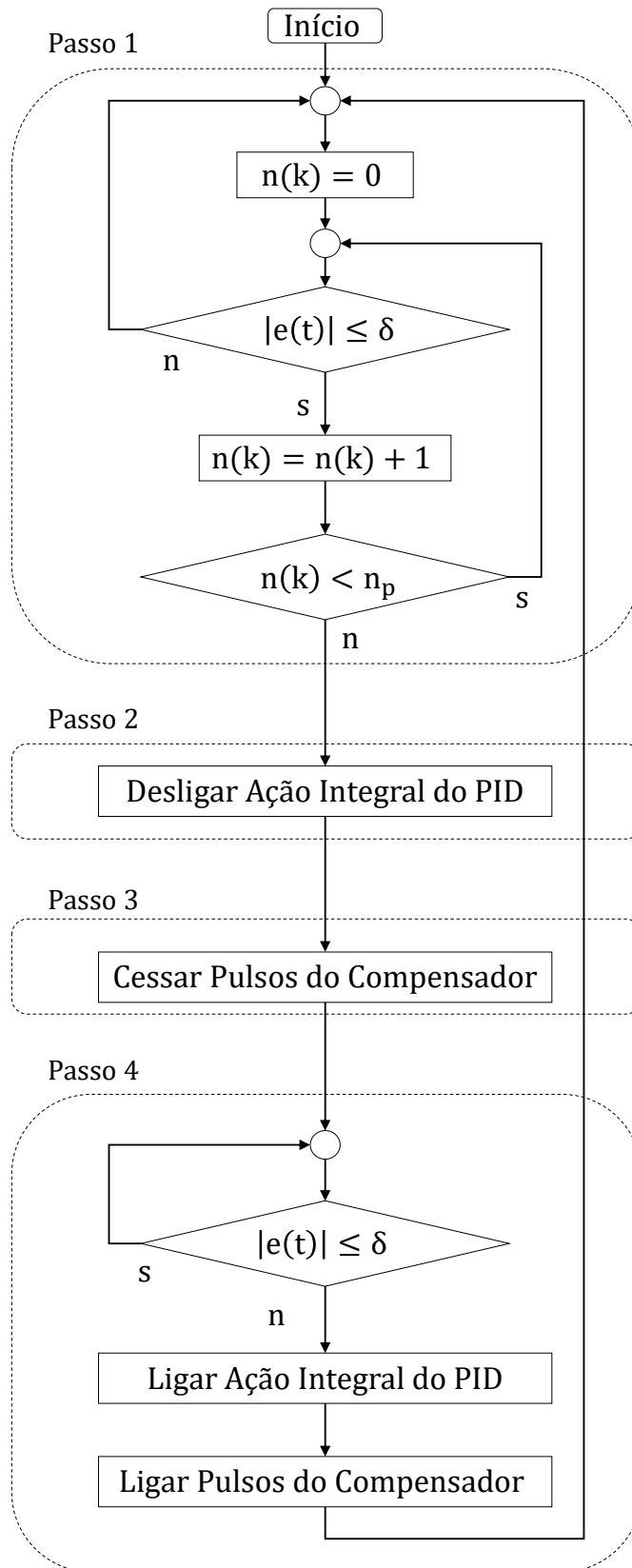
O método de compensação com amplitude variável é inspirado no trabalho de Arifin et al. (2014) e consiste em modular a amplitude dos pulsos de um compensador do tipo *knocker* com objetivo de fornecer pulsos com energia necessária para superar a força de atrito, reduzir as variações na amplitude do sinal da variável de saída $y(t)$ e a frequência com que as oscilações ocorrem. No método a amplitude dos pulsos são modulados em amplitude proporcionais ao sinal de erro $e(t)$ da malha de controle. Para simplificar o entendimento da metodologia utilizada o método foi dividido em quatro passos conforme é mostrado no fluxograma da Figura 29.

3.5.2 Passos para aplicação do método

Nesta seção serão explicados os quatro passos mostrados no fluxograma da Figura 29 para realizar a compensação de atrito em malhas de controle com amplitude variável dos pulsos. A compensação de atrito obedecerá nesse trabalho os seguintes passos:

- **Passo 1** - A contagem do instante de tempo $n(k)$ (sendo k um número inteiro e $k > 0$) é o tempo em que o valor absoluto do erro $|e(t)|$ está abaixo do limite de erro δ e baseia-se no monitoramento da condição ($|e(t)| \leq \delta$). Enquanto a condição não é satisfeita a contagem é reiniciada e o valor absoluto do erro $|e(t)|$ é continuamente monitorado. Caso a condição ($|e(t)| \leq \delta$) seja satisfeita é iniciada uma contagem do número de instante de tempo $n(k)$ em que o $|e(t)|$ está abaixo do limite de erro. Se esta contagem for superior ao valor de n_p será iniciado o passo 2 do fluxograma, onde será enviado um sinal para desligar a ação integral do controlador PI e para cessar a adição de pulsos do compensador de amplitude variável no sinal de controle;

Figura 29 – Fluxograma do método de compensação de atrito com amplitude dos pulsos variável.



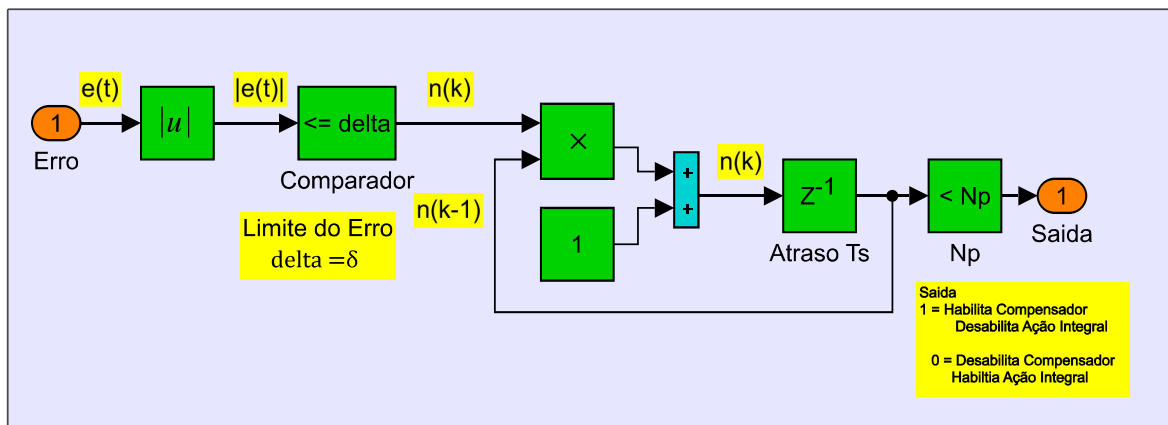
- **Passo 2** - A estratégia para desligar a ação integral do controlador PI e cessar os pulsos do compensador ocorre quando a condição ($|e(t)| \leq \delta$) durante $n(k)$ intervalos de tempo é satisfeita, logo é recebido um sinal para desligar o controlador PI e cessar os pulsos do compensador de atrito.
- **Passo 3** - Quando a condição ($DesabilitaPI = 1$) são cessados os pulsos com amplitude variável do compensador;
- **Passo 4** - É continuado o monitoramento da condição ($|e(t)| \leq \delta$) e caso ela não seja satisfeita é ligada a ação integral e o compensador com amplitude variável até reduzir o erro $|e(t)|$ abaixo do limite de erro δ retornando para o passo 1 do fluxograma;

3.5.3 Diagrama de monitoramento do erro absoluto

A estratégia utilizada para desabilitar a ação integral do controlador PI e cessar os pulsos do compensador de atrito de amplitude variável, depende do monitoramento do sinal absoluto do erro $|e(t)|$ o qual deve ser comparado com o valor do limite de erro mínimo δ . Após satisfeita a condição ($|e(t)| \leq \delta$) é iniciado a contagem do instante de tempo nT_s com ($n > 0$) em que o valor do erro absoluto $|e(t)|$ está abaixo do limite δ .

A cada instante de tempo em que o valor do erro absoluto $|e(t)|$ for menor do que o limite de erro δ a variável $n(k)$ é acrescida de uma unidade. Caso o valor do erro absoluto $|e(t)|$ esteja maior do que δ antes de $n(k)$ superar a variável n_p , a variável $n(k)$ recebe zero e a contagem é reiniciada e caso contrário a saída vai para nível zero e é dado o comando para cessar os pulsos do compensador e desabilitar a ação integral controlador PI. Se o valor do erro absoluto $|e(t)|$ voltar a ser maior do que δ os pulsos são novamente adicionados e a ação integral do controlador é habilitada. O diagrama de blocos utilizado para realizar esta lógica é mostrado na Figura 30.

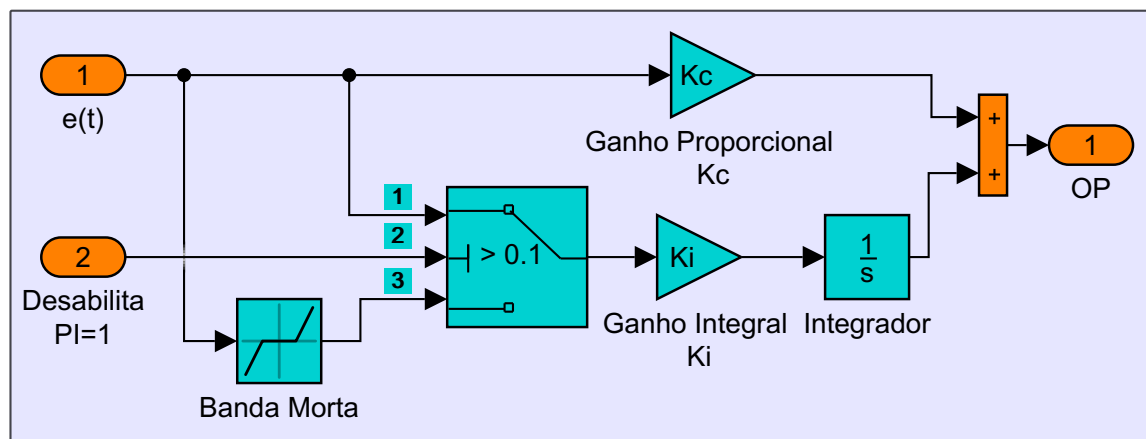
Figura 30 – Diagrama de blocos de contagem dos instantes de tempo nT_s com ($n > 0$) em que o erro absoluto $|e(t)|$ está abaixo do limite de erro δ .



3.5.4 Diagrama do controlador PI

Na Figura 31 é mostrado o diagrama de blocos do controlador PI. O diagrama também é utilizado para desabilitar a ação integral k_i do controlador PI quando a condição $(|e(t)| \leq \delta)$ é satisfeita durante nT_s instantes de tempo com $(n > 0)$.

Figura 31 – Diagrama de blocos utilizado para habilitar e desabilitar a ação integral do controlador PI.



No diagrama a chave seletora possui três entradas sendo duas Entradas de posição e uma Entrada de seleção. O erro $e(t)$ está conectado na Entrada 1 e o erro $e(t)$ mais a banda morta estão conectados na Entrada 3. O bloco banda morta conectado na Entrada 3 tem a mesma configuração do limite de erro δ fazendo que oscilações abaixo do limite de erro não ser integrado pelo controlador PI contribuindo para reduzir as oscilações.

Na Entrada 2 é conectado o sinal para desabilitar a ação do controlador PI. A seleção entre a Entrada 1 e a Entrada 3 é acionada pela lógica ($Desabilita\ PI > 0.1$). Quando ($Desabilita\ PI < 0.1$) a malha está sob ação do controlador Proporcional Integral, caso contrário a malha está somente sob ação do controlador Proporcional.

No início da simulação o sinal do erro $e(t)$ atravessa o Ganho Proporcional K_c e o Ganho Integral K_i através da Entrada 1. Após o compensador de atrito entrar em operação a condição ($Desabilita\ PI > 0.1$) da Entrada 2 é monitorada, e se a condição for satisfeita o sinal do erro $e(t)$ irá passar pela Entrada 3 passando somente pela ação do ganho proporcional K_c desabilitando a ação integral do controlador PI.

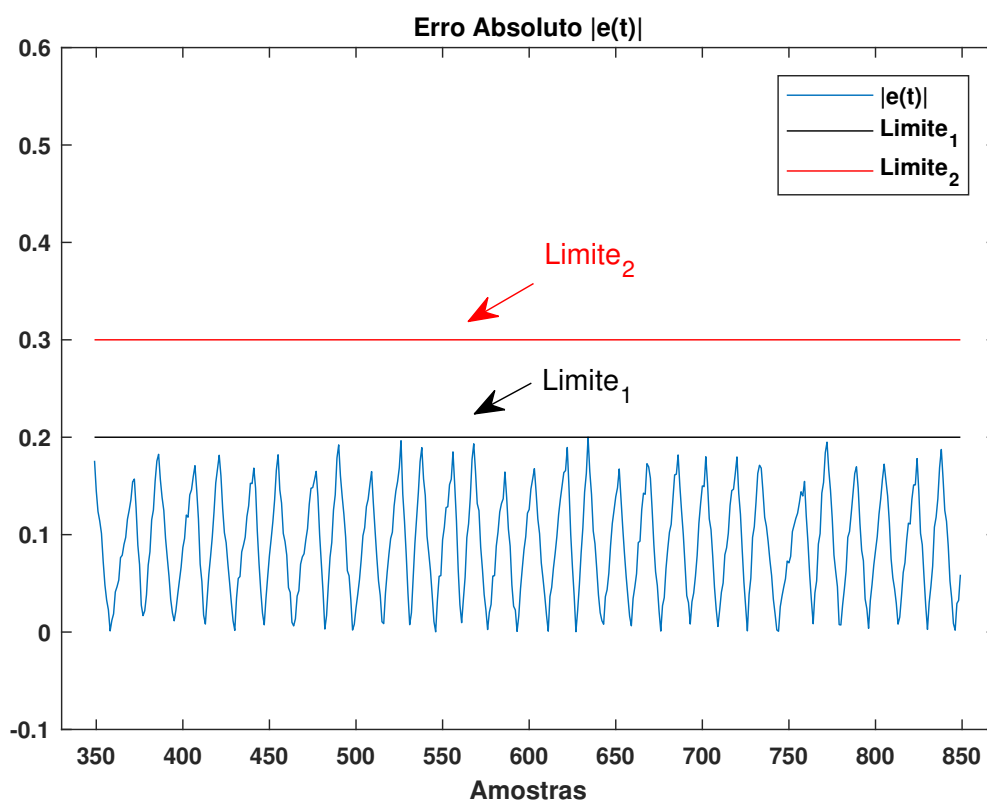
3.5.5 Limite sobre o erro absoluto

Na Seção 3.4.3.2 foi mostrado através da Figura 26 que o menor valor para o índice IAE foi alcançado em uma válvula de controle sob a ação de um compensador *knocker* com uma sequência de pulsos de amplitude $\alpha = S/2$, logo o erro mínimo $e(t)$ pode ser alcançado da mesma forma. Portanto, para obter o limite de erro será realizado uma

simulação com o diagrama de blocos da Figura 23 com referência de entrada $r(t)=30$, tempo de amostragem $T_s=1$ e tempo de simulação de 1000 s. O compensador *knocker* será ajustado com amplitude do pulso $\alpha=0.5S$, largura do pulso $\tau=1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k=3T_s$ conforme as recomendações obtidas na Seção 3.4.3.1.

Toda a simulação deverá ser realizada com o compensador *knocker* em operação e o menor valor obtido será o limite de erro δ e utilizado nas simulações com o compensador de amplitude variável. Na Figura 32 é mostrado o resultado da simulação para obter o menor erro com o compensador de atrito *knocker* com amplitude dos pulsos em $0.5S$.

Figura 32 – Erro absoluto $|e(t)|$ obtido com *knocker* e amplitude com $0.5S$.



Na Figura 32 é mostrado o comportamento do erro absoluto $|e(t)|$ e dois limites de erro de referência ($Limite_1=0.2$ e $Limite_2=0.3$). De acordo com o gráfico, o erro absoluto $|e(t)|$ está bem próximo do $Limite_1=0.2$, podendo um pequeno distúrbio fazer com que o erro absoluto supere este valor, logo uma boa escolha é o $Limite_2=0.3$.

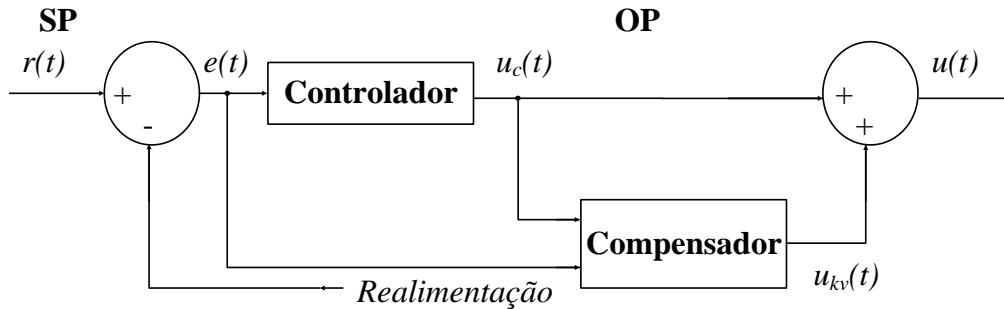
3.5.6 Amplitude dos pulsos do compensador

Na Figura 33 mostra-se parte do diagrama de blocos do compensador de atrito, que será tomado como base para o desenvolvimento das equações responsáveis pela modulação da amplitude dos pulsos do compensador em função do erro $e(t)$. O diagrama mostra que

o compensador de atrito recebe como sinais de entrada o sinal de controle $u_c(t)$ e o sinal do erro $e(t)$ da malha de controle.

O compensador tem como saída o sinal $u_{k_v}(t)$ que tem a finalidade de fornecer pulsos adicionais com energia suficiente para superar o atrito da válvula de controle.

Figura 33 – Parte do diagrama de blocos do compensador com amplitude dos pulsos variável utilizado para realizar o equacionamento do compensador.



No diagrama apresentado o sinal $u(t)$ é obtido através da soma do sinal do compensador $u_{k_v}(t)$ com o sinal de controle $u_c(t)$ conforme Equação 3.8.

$$u(t) = u_c(t) + u_{k_v}(t) \quad (3.8)$$

O sinal $u_{k_v}(t)$ é o pulso de saída do compensador de atrito com amplitude variável modulado em amplitude proporcional ao sinal do erro e definido na Equação 3.9.

$$u_{k_v}(t) = f(e(t)) \cdot u_k(t), \quad (3.9)$$

onde $f(e(t))$ é uma função moduladora da amplitude dos pulsos do compensador que será apresentada na próxima seção e u_k são os pulsos do knocker definido na Equação 3.3.

3.5.7 Função moduladora dos pulsos do compensador

A função moduladora $f(e(t))$, é responsável por modular a amplitude dos pulsos $u_{k_v}(t)$ do compensador, de acordo com as variações de erro $e(t)$. A função moduladora $f(e(t))$ é definida na Equação 3.10.

$$f(e(t)) = \begin{cases} \alpha_{max}, & \text{se } e(t) \geq e_{max} \\ a|e(t)| + b, & \text{demais casos} \\ \alpha_{min}, & \text{se } e(t) \leq e_{min} \end{cases} \quad (3.10)$$

onde α_{max} e α_{min} são parâmetros definidos pelo usuário e os parâmetros a e b são os parâmetros do coeficiente angular e coeficiente linear da função moduladora dos pulsos.

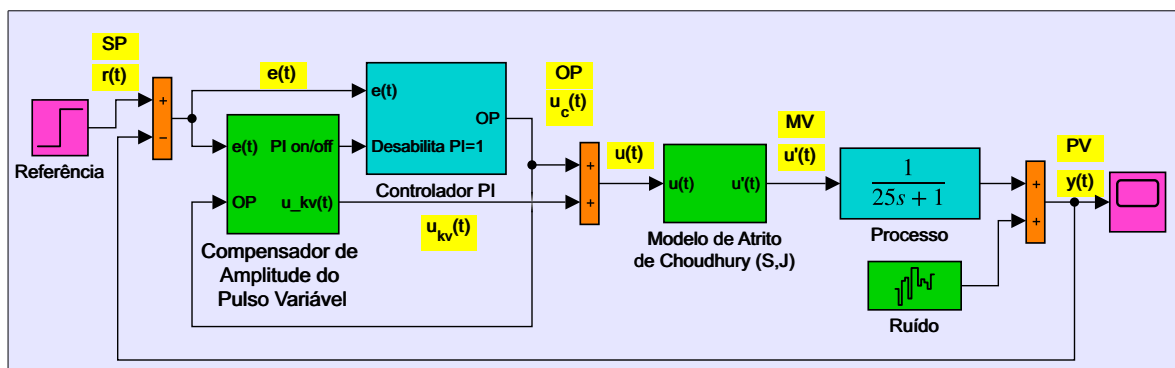
3.6 Ajustes dos parâmetros do compensador

O objetivo desta seção é a avaliação do método de compensação de atrito com amplitude variável em válvulas de controle através de simulações. Nas simulações serão avaliados os efeitos para diferentes escolhas de inclinações do sinal modulador e serão avaliados os efeitos para diferentes escolhas do limite do erro e diferentes escolhas de n_p , ou seja, o número de instantes de tempo em que o valor absoluto do erro $|e(t)|$ está abaixo do valor do limite do erro δ .

3.6.1 Diagrama de blocos utilizado nas simulações

Na Figura 34 é mostrado o diagrama de blocos que será utilizado para realizar as simulações do método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos.

Figura 34 – Diagrama de blocos do compensador com amplitude variável dos pulsos.



Para realizar as simulações, na referência de entrada será utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude $r(t)=30$. O bloco (Compensador de Amplitude do Pulso Variável) possui duas entradas sendo: i) entrada do erro $e(t)$ entre $y(t)$ e $r(t)$ utilizado como variável na função moduladora da amplitude dos pulsos do compensador (Equação 3.10) e ii) entrada do sinal $u_c(t)$ para obter a direção do sinal de controle, onde é identificado se o sinal é para abertura ou fechamento da válvula. As duas saídas do bloco são: i) a saída (*PI on/off*) envia um comando para habilitar ou desabilitar a ação integral k_i do controlador PI e ii) é o sinal de saída $u_{kv}(t)$ do compensador de atrito modulado em amplitude proporcional ao sinal de erro $e(t)$ conforme mostrado na Equação 3.8.

O bloco (Controlador PI) possui duas entradas sendo: i) entrada do sinal de erro $e(t)$ utilizado no controlador PI com ($k_c=8$ e $k_i=0.1$) e ii) entrada do sinal para habilitar ou desabilitar a ação integral k_i quando o sinal absoluto do erro $|e(t)|$ está abaixo do limite de erro δ durante n_p instantes de tempo, conforme explicado na Seção 3.5.4. Para o modelo do atrito é utilizado o modelo de dois parâmetros ($S=3\%$ e $J=1\%$) de Choudhury.

A dinâmica da válvula e do processo são representados pela função de transferência de primeira ordem mostrada no próprio diagrama da Figura 34. O limite de erro ajustado em $\delta=0.3$. O bloco que representa o ruído produz uma sequência aleatória com distribuição normal e potência de ruído $P_r=0.001$. O tempo de simulação é de 1000 s e o compensador de atrito foi habilitado para entrar em operação no instante de 500 s.

3.6.2 Sintonia dos parâmetros do compensador

O objetivo do compensador com amplitude variável é o fornecimento de uma energia adicional ($\alpha.\tau$) ao sinal de controle OP através de uma sequência de pulsos com amplitude variável. Os pulsos devem ser adicionados na mesma direção do sinal de controle e ser suficientes para superar o atrito sem adicionar pulsos extras na malha de controle.

Para alcançar os objetivos apresentados, são necessários ajustes (sintonia) nos parâmetros do compensador de atrito. Os parâmetros da sequência de pulsos serão ajustados conforme as recomendações da Seção 3.4.3.1 sendo: i) amplitude do pulso $\alpha=S$, ii) largura dos pulsos $\tau=1T_s$ e iii) tempo entre os pulsos $h_k=3T_s$.

3.6.3 Sintonia da amplitude do compensador

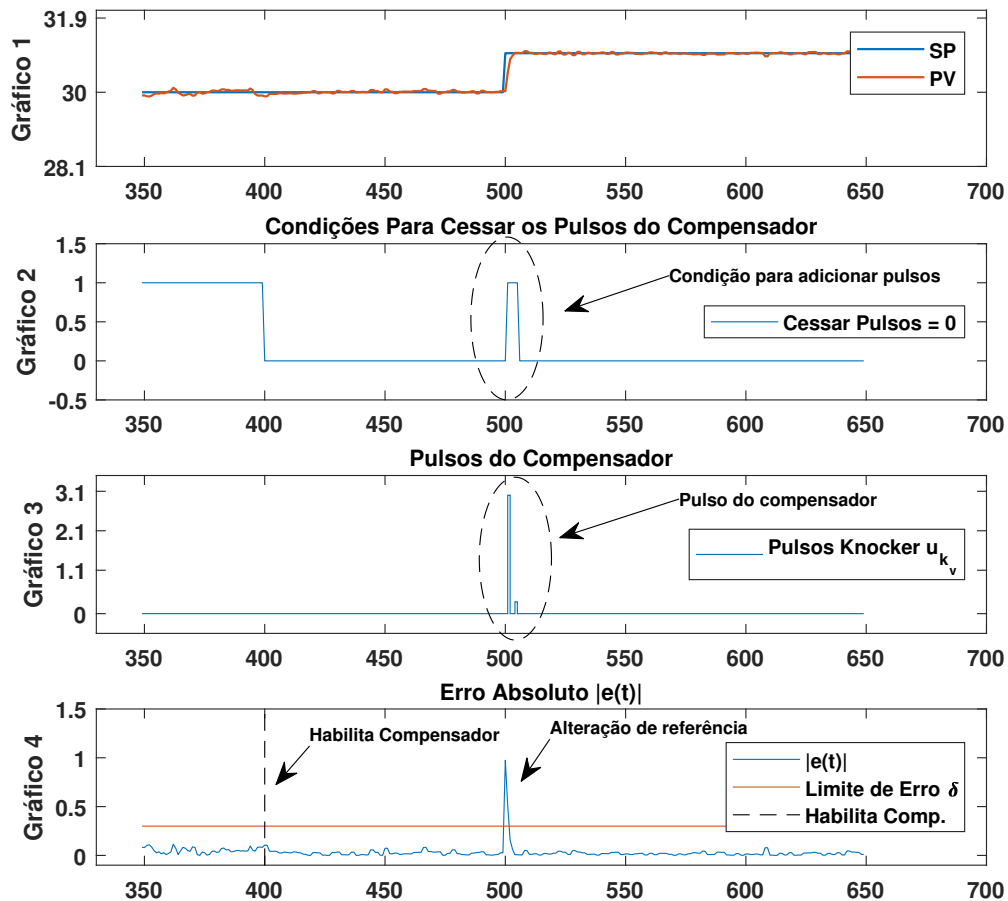
Nesta seção será apresentada uma metodologia para determinar os valores da amplitude máxima e mínima da Equação 3.10 que é responsável por modular a amplitude dos pulsos do compensador de atrito com amplitude variável. Os parâmetros a serem ajustados serão: i) amplitude máxima α_{max} dos pulsos do compensador, ii) amplitude mínima α_{min} dos pulsos do compensador, iii) parâmetro do coeficiente angular a e iv) parâmetro do coeficiente linear b .

Para obter uma maior eficiência na compensação de atrito, o valor da amplitude máxima dos pulsos do compensador será o mesmo valor da banda de agarramento S quando o valor absoluto do erro superar o limite de erro δ . Utilizando os resultados apresentados na Figura 26, será utilizado o intervalo entre $(0.1S$ e $1.0S)$ para modular a amplitude dos pulsos do compensador. Quando o erro absoluto for $|e(t)|=0$ o compensador deverá modular com amplitude mínima $\alpha_{min}=0.1S$ e quando o limite de erro $\delta=0.3$ for atingido o compensador deverá fornecer uma amplitude máxima de $\alpha_{max}=1.0S$.

Para o compensador operar com os valores de amplitude máxima e mínima desejada, serão utilizados na Equação 3.10 os seguintes valores: i) coeficiente angular da função moduladora $a=3$ e ii) coeficiente linear da função moduladora $b=0.1$. Para observar o comportamento do compensador e a amplitude dos pulsos durante a compensação, foi realizado uma simulação com o diagrama de blocos da Figura 23 com referência de entrada $r(t)=30$ alterando o valor da referência para $r(t)=31$ no instante de 500 s, tempo de amostragem $T_s=1$ e tempo de simulação de 1000 s.

Na Figura 35 é mostrado os resultados da simulação quando o valor absoluto do erro $|e(t)|$ foi superior ao limite de erro δ no instante de tempo de 500 s quando foi alterada a referência de entrada.

Figura 35 – Pulsos do compensador na mudança da referência de entrada $r(t)$ e com limite de erro $\delta=0.3$



Na Figura 35 no gráfico 4 a linha vertical preta pontilhada no instante de 400 s indica o momento em que o compensador foi habilitado. A partir deste momento, se a condição ($|e(t)| > \delta$) for satisfeita, o compensador adiciona pulsos com amplitude variável. No gráfico 4, o instante de 500 s é o momento em que é alterado a referência de entrada, onde é possível observar que o valor absoluto do erro (em azul) violou o limite de erro δ .

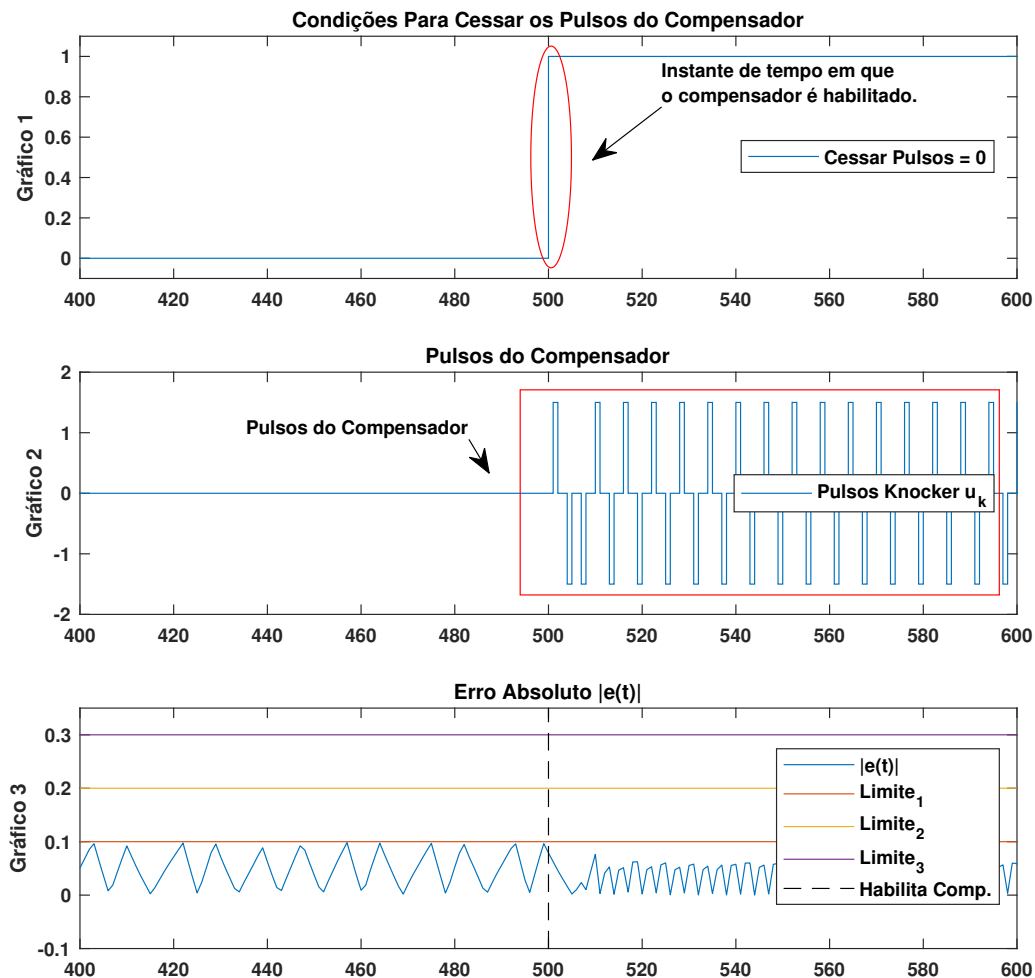
O gráfico 2 mostra que a condição para adicionar pulsos foi habilitada no instante de 500 s. No gráfico 3 é mostrado que foram adicionados pulsos com energia suficiente para trazer o valor absoluto do erro para valores abaixo do limite de erro δ e após 5 instantes de tempo $n_p = 5T_s$ a ação de controle foi desabilitada. No gráfico 1 são mostrados os comportamentos das variáveis $r(t)$ e $y(t)$ antes e após a alteração na referência $r(t)$.

3.6.4 Sintonia do valor do limite de erro

Na Seção 3.4.3.2 é mostrado através da Figura 26 que o melhor cenário para obter o menor valor de erro $e(t)$ em uma válvula com atrito, pode ser alcançado aplicando o compensador *knocker* com amplitude dos pulsos fixa em $\alpha = S/2$. Portanto, para obter o limite de erro será realizada uma simulação utilizando o diagrama de blocos da Figura 23, com referência de entrada um sinal do tipo degrau com amplitude $y(t)=30$, tempo de amostragem $T_s=1$ e tempo de simulação de $t = 1000$ s.

O compensador *knocker* foi ajustado com amplitude do pulso $\alpha=0.5S$, largura do pulso $\tau=1T_s$ e amplitude do $h_k=3T_s$ conforme as recomendações da Seção 3.4.3.1. O compensador *knocker* foi habilitado para entrar em operação no instante $t = 500$ s até o fim da simulação. Na Figura 36 são mostrados os resultados da simulação realizada para obter os menores valores para o limite de erro δ .

Figura 36 – Erro absoluto obtido em uma malha de controle sob ação de um compensador de atrito *knocker* com amplitude dos pulsos fixa em $\alpha=0.5S$.



Na Figura 36 o gráfico 1 mostra as condições para cessar os pulsos do compensador quando o sinal cessar pulsos está em nível zero. Após o instante de $t = 500$ s é mostrado que o sinal está em nível 1 habilitando os pulsos do compensador. No gráfico 2, é mostrado após o instante de tempo de $t = 500$ s, uma sequência de pulsos regulares com amplitude $\alpha = S/2$ do compensador de atrito *knocker*.

Durante toda a simulação a condição que desabilita os pulsos do compensador utilizando o sinal do limite de erro δ foi desabilitada para não cessar os pulsos do compensador. No gráfico 3 foram adicionados três valores de limite de erro de referência sendo: $Lim\ 1 = 0.1$, $Lim\ 2 = 0.2$ e $Lim\ 3 = 0.3$. Estes valores foram inseridos para serem utilizados como referência no ajuste do limite de erro δ .

É possível observar através do gráfico 3 que antes do instante de tempo $t = 500$ s enquanto o compensador está fora de operação alguns valores do erro absoluto $|e(t)|$ estão bem próximo ao $Lim\ 1 = 0.10$ e após o compensador ser habilitado a variação dos valores absoluto do erro foram reduzidas. Portanto, devido as variações observadas nos valores absoluto do erro, será adotado como valor para o limite de erro $\delta = 0.3$. O valor foi escolhido para operar com uma margem de valores absoluto de erro segura.

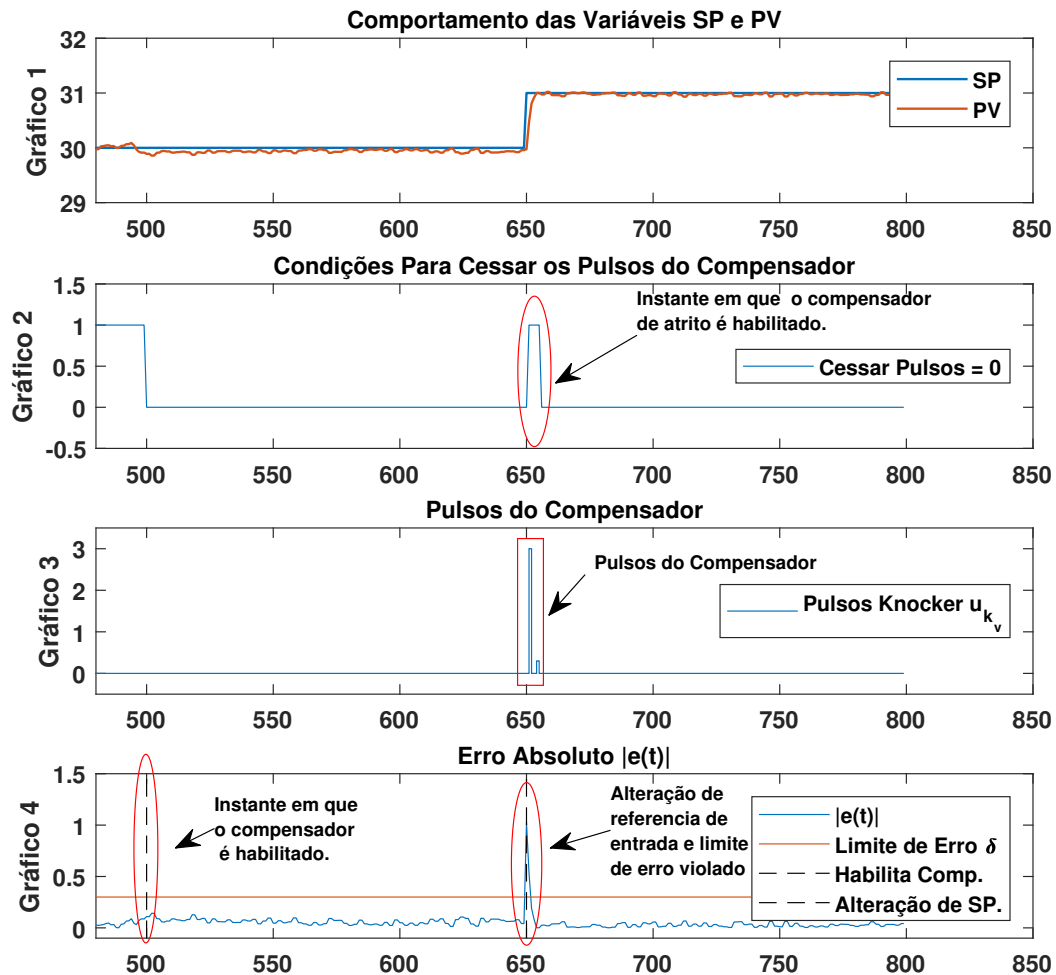
3.7 Aplicação do método de compensação de atrito com amplitude variável em casos de simulação

O objetivo desta seção é mostrar o funcionamento do método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos. Em pleno funcionamento o compensador de atrito deve fornecer pulsos quando o limite de erro δ for superado pelo valor absoluto do erro $|e(t)|$. A quantidade de energia fornecida pelo compensador por meio de pulsos deverá ser suficiente para superar o atrito na válvula e não adicionar pulsos desnecessários e com isso conseguir reduzir a quantidade de movimento na haste da válvula.

O funcionamento do compensador de atrito será mostrado através de simulação, para a situação em que ocorre uma mudança na referência de entrada $r(t)$ da malha de controle. O compensador de atrito somente é habilitado no instante de tempo $t = 500$ s, porém o compensador entra em operação nos momentos em que o valor absoluto do erro $|e(t)|$ for superior ao limite de erro δ .

Para o valor absoluto do erro $|e(t)|$ ultrapassar o limite de erro δ , foi realizada uma alteração na referência de entrada da malha de controle de $r(t) = 30$ para $r(t) = 31$. A alteração foi realizada no instante de tempo $t = 650$ s. Na Figura 37 são mostrados os resultados obtidos na simulação com alteração na referência de entrada e com limite de erro em $\delta = 0.3$, amplitude dos pulsos α variando entre $0.1S$ e $1.0S$ e instantes de tempo em que o valor absoluto do erro está abaixo do limite de erro δ ajustado em $n_p = 5T_s$.

Figura 37 – Erro absoluto com limite de erro ajustado em $\delta=0.3$ e amplitude variável dos pulsos entre $(0.1S$ e $1.0S)$ e $n_p=5T_s$



Na Figura 37 no gráfico 1 é mostrado o comportamento da variável de entrada do processo $r(t)$ e da variável de saída do processo $y(t)$ antes e após ser realizada uma alteração no valor da referência de entrada da malha de controle $r(t)$. No gráfico 2 é mostrado que após o compensador de atrito ser habilitado no instante de tempo de $t = 500$ s o valor do limite de erro δ não foi violado e o sinal de cessar pulsos foi para nível baixo, ou seja, recebe zero e permanece assim até que o limite do erro seja violado, enquanto isso não serão adicionados pulsos pelo compensador de atrito.

No instante de tempo $t = 650$ s, foi alterada a referência de entrada de $r(t) = 30$ para $r(t) = 31$ para observar o comportamento do compensador de atrito com valores absoluto de erro maior que o limite de erro δ . Após a alteração no sinal de referência de entrada, é possível observar no gráfico 2, que o sinal de cessar pulsos está em nível alto habilitando o compensador de atrito para adicionar pulsos no sinal de controle.

No gráfico 3 após o instante $t = 650$ s é mostrado que o compensador adicionou um pulso com amplitude pulso $\alpha = 3$ e outro pulso de menor amplitude. Os pulsos adicionados foram suficientes para reduzir o sinal absoluto do erro abaixo do limite de erro δ . O gráfico 4 mostra que após o compensador de atrito ser habilitado no instante $t = 500$ s, o limite de erro não foi superado pelo sinal absoluto do erro, logo não foram adicionados pulsos ao sinal de controle.

Após o instante de tempo $t = 650$ segundo, quando foi alterado o valor da referência de entrada da malha de controle, o valor absoluto do erro superou o limite de erro, e logo em seguida o compensador de atrito entrou em operação e reduziu o valor absoluto do erro para um valor abaixo do limite de erro δ durante $n_p = 5T_s$ instantes de tempo e na sequência foram cessados os pulsos do compensador de atrito e a ação integral do controlador PI foi desabilitada.

3.7.1 Efeitos da inclinação da rampa da função moduladora

O objetivo desta seção é avaliar através de simulações, os efeitos para diferentes escolhas de valores do coeficiente angular, de inclinação da rampa da função moduladora da Equação 3.10, sobre os índices IAE e QM . O coeficiente angular da função moduladora é responsável pela inclinação da rampa do sinal modulador, tornando assim a ação do compensador mais rápida ou mais lenta ao ocorrer variações no valor do erro da malha de controle.

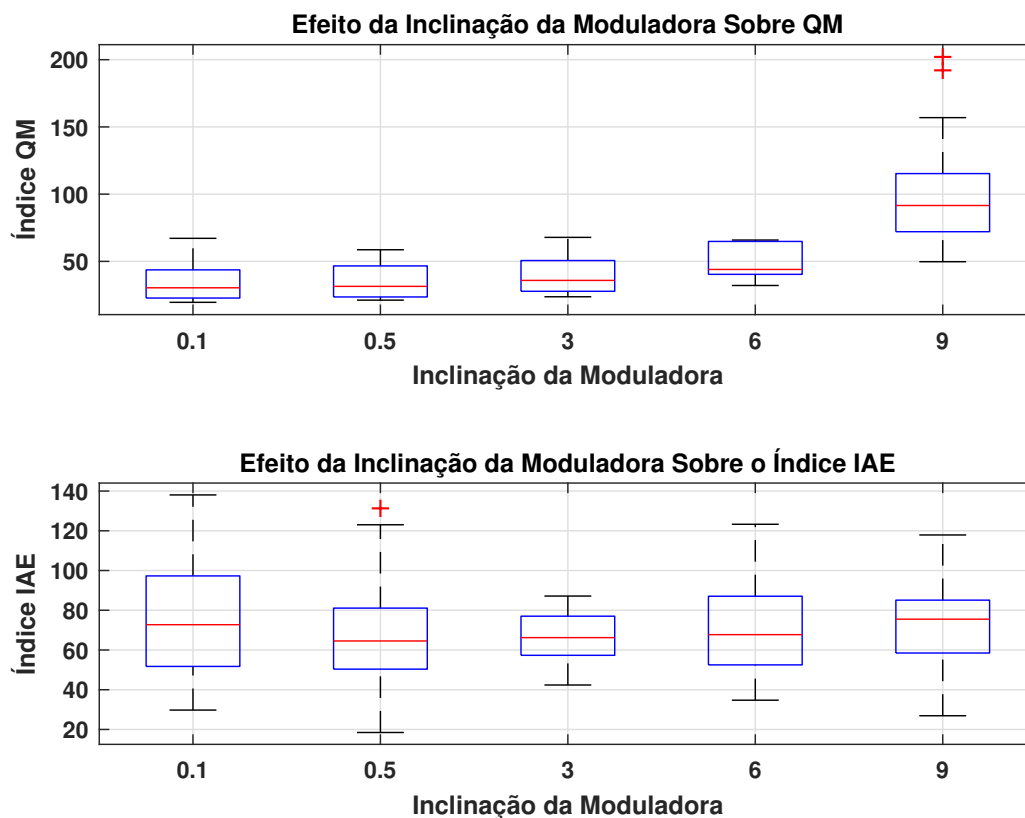
Para avaliar os efeitos das diferentes escolhas na inclinação do sinal modulador, foram realizadas simulações utilizando o diagrama de blocos da Figura 34 para diversos valores do coeficiente angular, variando entre $a = \{0.1, 0.5, 3, 6, 9\}$ e realizando vinte repetições para cada valor de coeficiente angular.

O limite de erro foi ajustado em $\delta = 0.3$ conforme sintonia realizada na Seção 3.6.4. A amplitude dos pulsos α será modulada no intervalo entre $0.1S$ e $1.0S$ e a quantidade de instantes de tempo em que o valor absoluto do erro permanece abaixo do limite de erro δ foi ajustado em $n_p = 5T_s$.

Os pulsos do compensador foram ajustados conforme as recomendações obtidas na Seção 3.4.3.1 com amplitude dos pulsos $\alpha = S$, largura dos pulsos $\tau = 1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k = 3T_s$. Na referência de entrada foi utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude $y(t) = 30$. O tempo de simulação utilizado foi de 1000 s e o compensador entrou em operação no instante de tempo de 500 s.

Os índices IAE e QM foram calculados no intervalo de tempo em que o compensador de atrito está em operação, no intervalo entre 500 s a 1000 s. Os resultados obtidos da simulação para os diversos valores do coeficiente de angular de inclinação do sinal da função moduladora da Equação 3.10, são mostrados na Figura 38.

Figura 38 – Efeitos para diferentes escolhas de inclinação da função moduladora dos pulsos sobre os índices IAE e QM, com limite de erro $\delta=0.3$, amplitude dos pulsos variável entre $0.1S$ e $1.0S$.



Na Figura 38 no gráfico superior, são mostrados os efeitos para as diferentes escolhas de inclinações da rampa do sinal modulador, sobre a quantidade de movimento realizado pela válvula QM . Ainda no gráfico superior é mostrado que o aumento do valor do coeficiente angular a , apresenta uma tendência de aumento significativa na mediana dos conjuntos de dados, evidenciando assim que o parâmetro afeta significativamente o índice QM . Logo, através do gráfico superior é observado que para valores do coeficiente angular da função moduladora acima de $a = 3$ é aumentada a quantidade de movimento na haste da válvula

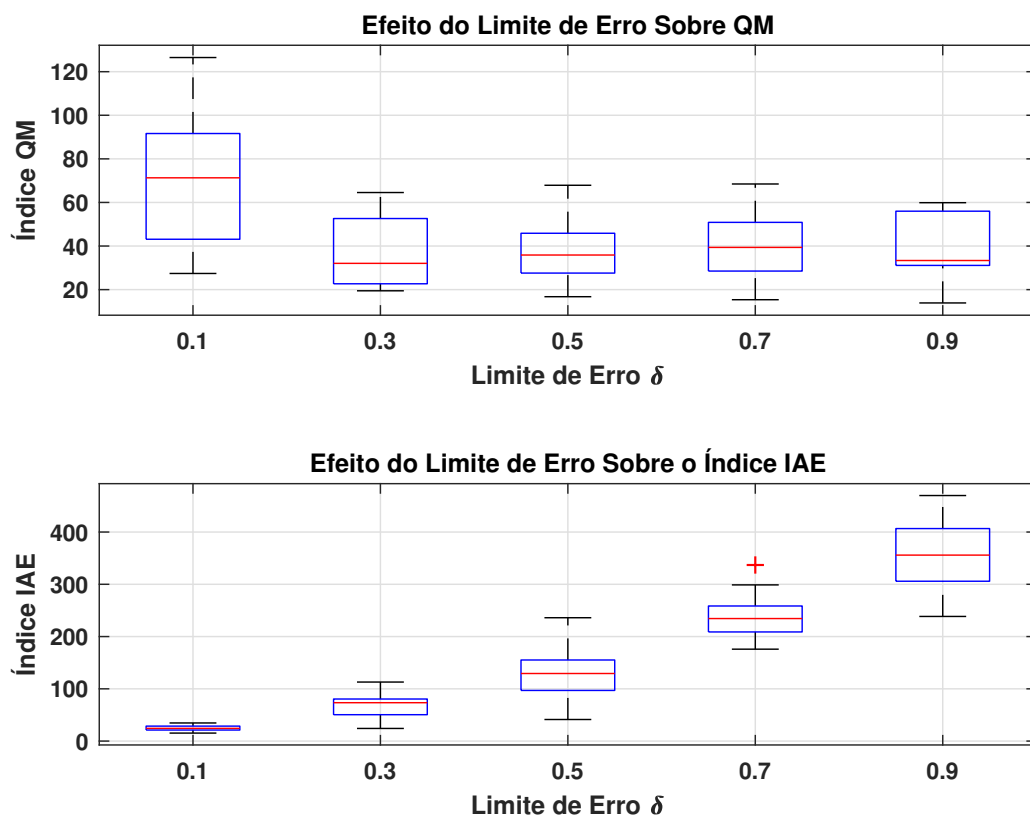
No gráfico inferior é mostrado os efeitos para as diferentes escolhas do parâmetro responsável pela inclinação da rampa do sinal modulador sobre o índice de desempenho IAE . O gráfico inferior mostra que para as diferentes escolhas dos valores de inclinação da rampa da função moduladora não ocorreram alterações significativas sobre o valor da mediana do sinal, logo o coeficiente angular da rampa do sinal modulador não produz efeitos significativos sobre o índice de desempenho IAE .

3.7.2 Efeitos do limite sobre o erro absoluto

O objetivo desta seção é avaliar através de simulações os efeitos de diferentes escolhas de valores para o limite de erro δ . O limite de erro é responsável por habilitar ou desabilitar os pulsos do compensador e a ação integral do controlador PI. Nesta seção não serão utilizados nas simulações os valores de limite de erro entre ($0 \leq \delta \leq 0.1$), pois não são valores possíveis de serem obtidos por este compensador devido a dinâmica do sistema.

Para avaliar os efeitos das diferentes escolhas dos limites de erro δ , foram realizadas simulações utilizando o diagrama de blocos da Figura 34. As simulações foram realizadas variando o limite de erro entre $\delta = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$ repetindo vinte vezes para cada valor de δ . A amplitude dos pulsos α foi modulada no intervalo entre $0.1S$ e $1.0S$ e o valor de $n_p = 5T_s$. Os parâmetros da sequência de pulsos foram ajustados conforme as recomendações da Seção 3.4.3.1 com amplitude $\alpha = S$, largura dos pulsos $\tau = 1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k = 3T_s$. O tempo de simulação foi de 1000 s e o compensador foi habilitado em $t = 500$ s. Os índices IAE e QM foram calculados no intervalo entre 500 s e 1000 s. Na Figura 39 são mostrados os resultados obtidos na simulação para os diferentes valores de limite de erro δ .

Figura 39 – Efeitos para diferentes escolhas do limite de erro δ sobre os índices IAE e QM , $n_p = 5T_s$ e amplitude variável dos pulsos entre (0.1S e 1.0S).



Na Figura 39 no gráfico superior são mostrados os efeitos para as diferentes escolhas do limite de erro δ sobre a quantidade de movimento QM realizado pela válvula. O gráfico superior mostra que para valores de limite de erro menores que ($\delta < 0.3$) a mediana é fortemente afetada pela escolha do limite de erro δ .

Para os valores de limite de erro ($\delta \geq 0.3$) a mediana dos conjuntos de dados não apresentaram alterações significativas com o aumento dos valores do limite sobre o erro δ . Portanto o índice QM é fortemente afetado para os valores de limite de erro ($\delta < 0.3$), pois quanto menor o limite de erro, mais fácil será para o erro absoluto superar este valor de limite de erro.

No gráfico inferior são mostrados os efeitos para as diferentes escolhas dos valores do limite de erro δ sobre o índice de desempenho IAE . O gráfico inferior mostra que de acordo com o aumento do valor do limite de erro δ o valor da mediana do conjunto de dados é fortemente alterada. Portanto o aumento no valor do limite de erro produziram efeito significativo sobre o índice de desempenho IAE .

3.7.3 Efeitos do parâmetro n_p

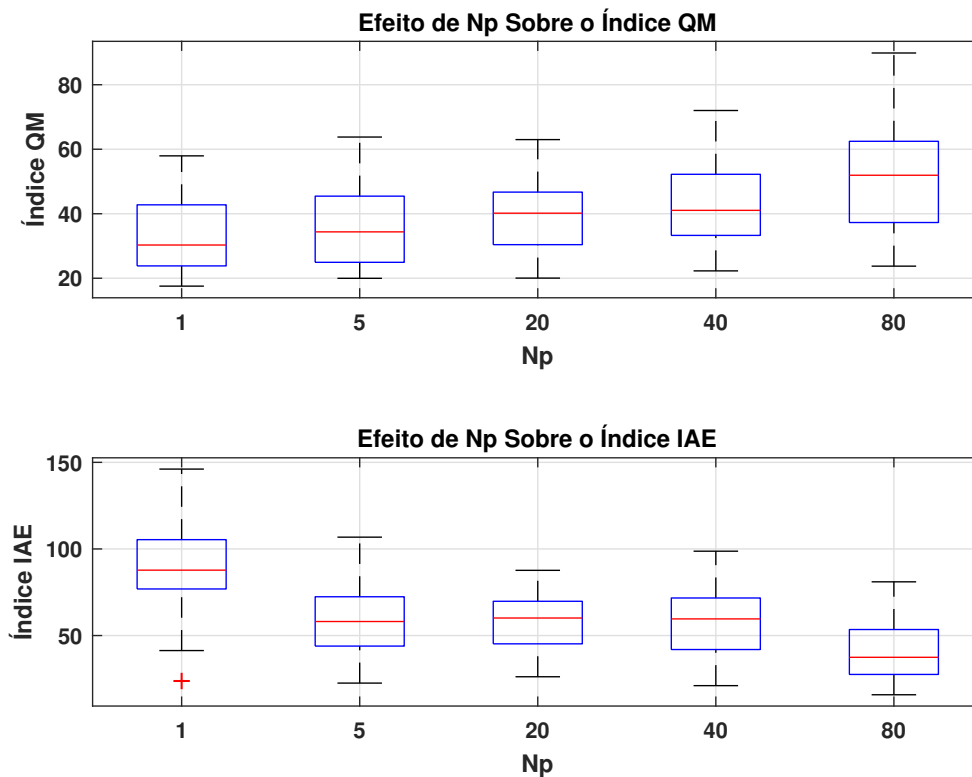
O objetivo desta seção é avaliar através de simulações os efeitos de diferentes escolhas da quantidade de instantes de tempo em que o limite de erro δ deve permanecer permanece abaixo de n_p sobre os índices IAE e QM . Conforme descrito na Seção 3.5.3 a quantidade de instantes de tempo n_p é responsável por enviar um sinal para o bloco do compensador para cessar os pulsos do compensador e para o bloco do controlador PI para desabilitar a ação integral do controlador PI.

Para verificar os efeitos de diferentes escolhas dos valores de n_p sobre os índices, serão necessárias a realização de simulações utilizando o diagrama de blocos mostrado na Figura 34, para os diferentes valores do parâmetro $N_p = \{1, 5, 20, 40, 80\}$ repetindo vinte vezes para cada um dos valores de n_p .

Na simulação, os valores da amplitude dos pulsos α do compensador de atrito serão moduladas no intervalo entre $0.1S$ e $1.0S$ em função do erro da malha de controle. A sequência de pulsos do compensador foram ajustados conforme as recomendações da Seção 3.4.3.1 com amplitude dos pulsos $\alpha = S$, largura dos pulsos $\tau = 1T_s$ e tempo entre os pulsos $h_k = 3T_s$. Na referência de entrada da malha foi utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude $r(t) = 30$.

O compensador de atrito foi habilitado na simulação no instante de $t = 500$ s e o tempo total de simulação foi de 1000 s. Os cálculos dos índices IAE e QM foram realizados no intervalo de tempo entre 500 s até o fim da simulação no instante de $t = 1000$ s. Na Figura 40 são mostrados os resultados obtidos na simulação para os diferentes valores de n_p .

Figura 40 – Efeitos para diferentes escolhas de n_p sobre os índices IAE e QM com amplitude variável dos pulsos e limite de erro $\delta=0.3$



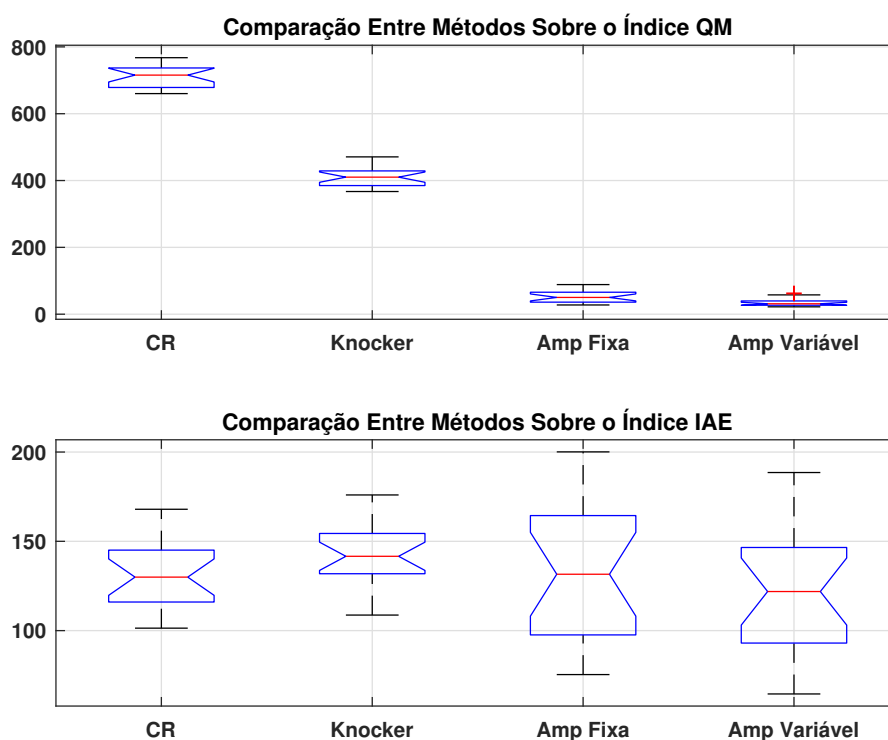
No gráfico superior da Figura 40 são mostrados os efeitos para as diferentes escolhas dos valores de n_p sobre o índice QM . No gráfico superior é mostrado que o aumento do valor de n_p no conjunto de dados apresenta uma baixa tendência de aumentar a mediana, porém, o índice QM é pouco afetado para variações no parâmetro de n_p . No gráfico inferior são mostrados os efeitos para as diferentes escolhas dos valores de n_p sobre o índice de desempenho IAE . O gráfico inferior mostra que com o aumento do valor de n_p , o valor da mediana dos conjuntos de dados também vão reduzindo. Portanto, o índice IAE é sensível ao aumento dos valores de n_p .

3.8 Comparação entre os métodos com amplitude fixa e amplitude variável

O objetivo desta seção é realizar através de simulação uma comparação do método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos com os seguintes métodos de compensação: compensador reforço constante, *knocker* e amplitude fixa dos pulsos. Dentre os métodos, será analisado se o método de compensação com amplitude variável dos pulsos apresenta uma maior redução dos índices IAE e QM.

Para realizar as comparações dos resultados, foram realizadas simulações utilizando o diagrama de blocos da Figura 34. Na referência de entrada foi utilizado um sinal do tipo degrau com amplitude de $r(t) = 30$ e alterando o valor para $r(t) = 31$ no instante de tempo 650 s e com tempo total de simulação de 1000 s. Cada simulação será repetida vinte vezes para cada um dos métodos de compensação. Os resultados obtidos nas simulações para os métodos de compensação de atrito são mostrados na Figura 41.

Figura 41 – Comparação entre Métodos Sobre os índices QM e IAE.



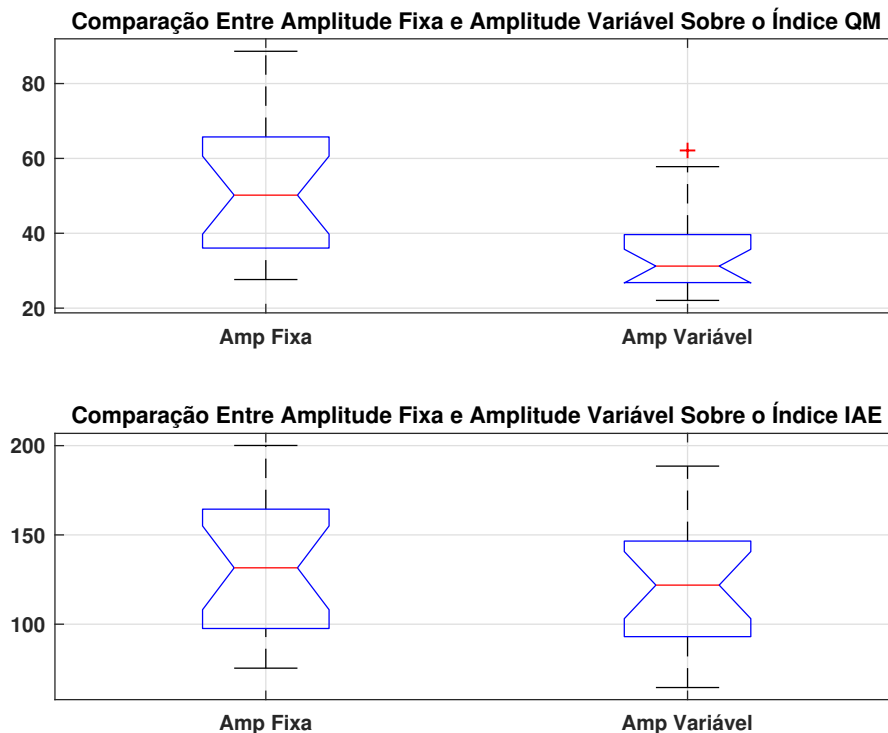
Na Figura 41 no gráfico superior são mostrados os resultados obtidos na simulação para o índice QM. O valor da mediana para o conjunto de dados do compensador CR apresentou o maior valor de mediana seguido do compensador *knocker* quando é comparado com os outros dois métodos.

No gráfico inferior são mostrados os resultados das simulações para os quatro métodos sobre o índice IAE. Nas simulações realizadas os quatro métodos de compensação apresentaram bons resultados. É possível observar que os valores das medianas no conjunto de dados do índice IAE estão sobrepostos, logo não é possível afirmar que mediana do conjunto de dados possui valores diferentes para o índice IAE.

Ainda na Figura 41 os gráfico dos resultados do compensador de amplitude variável e amplitude fixa dos pulsos serão reproduzidos em um novo gráfico para observar com mais detalhes dentre os dois métodos, os que apresentaram melhor resultado. Na Figura 42 são

apresentados a comparação entre os métodos de compensação de amplitude fixa e variável dos pulsos.

Figura 42 – Comparação entre Amplitude Fixa e Variável Sobre QM e IAE.



Na Figura 42 no gráfico superior, podemos concluir que no gráfico do índice QM do compensador com amplitude variável dos pulsos o valor da mediana obtida foi muito menor do que o compensador de amplitude fixa, indicando assim que o compensador com amplitude dos pulsos fixa reduziu consideravelmente a quantidade de movimento na válvula. No gráfico inferior, podemos concluir que no gráfico do índice IAE do compensador com amplitude variável dos pulsos os valores das medianas estão sobrepostas, indicando assim que não é possível afirmar que os conjuntos de dados possuem medianas diferentes, o que podemos concluir que os dois compensadores melhoraram o desempenho da malha de controle.

3.9 Conclusões do capítulo

O presente capítulo foi iniciado com uma introdução dos métodos de compensação de atrito existente na literatura. Em seguida foram apresentados os métodos de compensação de atrito baseado em modelo e os métodos de compensação livre de modelo. Foram destacados os métodos de compensação livre de modelo e os baseados na adição de pulsos ao sinal de controle. Foram apresentados os compensadores de atrito com amplitude fixa do tipo *knocker* e reforço constante.

Em seguida foi apresentado a metodologia para realizar os ajustes dos parâmetros dos compensadores e os efeitos da amplitude dos pulsos na compensação. Foi evidenciado através de simulação que o compensador *knocker* apresenta baixos valores de quantidade de movimento QM e altos valores no índice IAE para amplitude dos pulsos baixa e altos valores de quantidade de movimento QM e baixos valores de IAE para amplitude dos pulsos baixa.

A simulação com o compensador RC, demonstrou que o compensador opera com valores médios do índice IAE e baixos valores do índice QM para amplitude dos pulsos baixas e altos valores de quantidade de movimento QM e altos valores do índice IAE para amplitude alta dos pulsos.

Na sequência foi apresentado o método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos. Foi descrito o funcionamento do método e apresentado a metodologia de ajuste dos parâmetros de limite de erro δ , amplitude α_{max} e α_{min} da função moduladora dos pulsos e do valor de n_p da quantidade de instantes de tempo em que o valor absoluto do erro $|e(t)|$ fica abaixo do limite de erro δ .

Foi realizado o ajuste dos parâmetros necessários ao funcionamento do método de compensação com amplitude variável e avaliado os efeitos dos parâmetros do compensador na compensação. Foi evidenciado através de simulação que o aumento do valor do parâmetro a do coeficiente angular de inclinação da rampa da função moduladora dos pulsos aumenta a quantidade de movimento da válvula.

Em seguida foi evidenciado através de simulação que ao aumentar o limite de erro δ reduz a quantidade de movimento QM da válvula, e, em contrapartida, aumenta o índice IAE reduzindo o desempenho da malha de controle. Foi evidenciado que ao aumentar os valores do parâmetro n_p , aumenta-se o índice QM e reduz-se o índice IAE

Por fim foi realizado simulações com os métodos de compensação reforço constante, *knocker*, amplitude fixa e amplitude variável dos pulsos para comparar dentre os métodos os efeitos na redução da quantidade de movimentos QM e na redução do índice IAE. Os resultados da simulação evidenciaram que o compensador RC apresentou valores baixos no índice IAE, porém, aumentou o índice QM.

Foi evidenciado através de simulação que o compensador de atrito com amplitude variável dos pulsos foi capaz de reduzir os índices IAE e QM quando comparado com o método reforço constante, *knocker*, amplitude fixa. A redução do índice IAE e da quantidade de movimento na válvula aumenta a vida útil da válvula e proporciona que um maior tempo para realizar uma parada programada para troca da válvula com atrito.

Conclusão

4.1 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

No presente trabalho foi descrito o problema de atrito em válvulas de controle, que pode aumentar a variabilidade do processo e causar prejuízos na indústria. Para solucionar este problema, foi proposto caracterizar a presença do atrito e realizar a quantificação e aplicar um método de compensação de atrito com amplitude variável dos pulsos.

Foram avaliados métodos de quantificação de atrito baseado na identificação do modelo de *Hammerstein*, suas variações e problemas abordados. Este método foi aplicado em dados de simulação e de um processo real. Ao realizar a aplicação do método foram verificados os efeitos na quantificação de atrito para variações no parâmetro do salto J e constatado que o parâmetro do salto não afeta significativamente a quantificação de atrito.

Foram avaliados os efeitos na quantificação de atrito para diferentes ordens do modelo linear e os resultados mostraram que aumentar a ordem do modelo não apresentaram efeitos significativos na quantificação de atrito, entretanto, existe uma tendência do valor estimado estar mais próximo do valor real do atrito.

Foram avaliados também os efeitos de variações no ganho proporcional na quantificação de atrito e evidenciando que o aumento deste ganho levam os valores estimados a se afastarem dos valores reais da quantificação. Por último foi avaliado o efeito da potência de ruído na quantificação de atrito e foi mostrado que ao aumentar a potência de ruído, existe uma tendência dos valores estimados se afastarem dos valores reais da quantificação de atrito.

Uma grande contribuição deste trabalho foi realizar a compensação de atrito com um compensador de amplitude variável, onde os pulsos do compensador são modulados em função do sinal de erro da malha de controle e após reduzir o erro abaixo de um valor de limite é cessado os pulsos do compensador e desligado a ação integral do controlador

PI. Foram avaliados os efeitos da compensação com amplitude variável dos pulsos sobre a quantidade de movimento QM e sobre o IAE.

Foi avaliado o efeito do aumento do coeficiente de inclinação da rampa da função moduladora dos pulsos e evidenciado que o parâmetro aumenta a quantidade de movimento da válvula, mas não afeta significativamente o índice IAE. Foi avaliado o efeito do limite de erro δ reduz a quantidade de movimento QM da válvula, e, em contrapartida, aumenta o índice IAE reduzindo o desempenho da válvula de controle. Foi evidenciado que ao aumentar os valores do parâmetro N_p , aumenta os valores do índice QM e reduz o valor do índice IAE.

Por fim foram realizadas simulações com os métodos de compensação Reforço Constante, *Knocker*, amplitude fixa e amplitude variável dos pulsos para comparar dentre os métodos os efeitos na redução da quantidade de movimentos QM e na redução do índice IAE. Os resultados da simulação evidenciaram que o compensador com amplitude variável dos pulsos apresentou os melhores resultados no índice IAE e no índice QM garantindo assim o aumento na vida útil da válvula de controle.

Este trabalho admite diversas possibilidades de continuidade para quantificação e compensação de atrito, onde se destacam as seguintes:

- Aplicar o método de quantificação a uma maior quantidade de casos da indústria.
- Aplicar o método de compensação com amplitude variável em uma malha de controle real em uma indústria.
- Aplicar o método de compensação em malhas de controle de pressão nível e temperatura para garantir uma maior aplicação do método.
- Quantificar o aumento do tempo em que é aumentado a vida útil da válvula após a aplicação do método.

Referências

- ARAUJO, A. P.; MUNARO, C. J.; FILHO, M. R. Quantification of valve stiction and dead band in control loops based on the harmonic balance method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 51, n. 43, p. 14121–14134, 2012. Citado na página 23.
- ARIFIN, B. et al. A model free approach for online stiction compensation. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 47, n. 3, p. 5957–5962, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 58.
- ARMSTRONG, B.; WIT, C. C. D. Friction modeling and compensation. *The control handbook*, CRC Press Boca Raton, FL, v. 77, p. 1369–1382, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 47.
- ARMSTRONG-HÉLOUVRY, B.; DUPONT, P.; WIT, C. C. D. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica*, Elsevier, v. 30, n. 7, p. 1083–1138, 1994. Citado na página 47.
- BAI, E.-W. An optimal two-stage identification algorithm for hammerstein–wiener nonlinear systems. *Automatica*, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 333–338, 1998. Citado na página 27.
- BAI, E.-W. Identification of linear systems with hard input nonlinearities of known structure. *Automatica*, Elsevier, v. 38, n. 5, p. 853–860, 2002. Citado na página 28.
- BAI, E.-W. Decoupling the linear and nonlinear parts in hammerstein model identification. *Automatica*, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 671–676, 2004. Citado na página 28.
- BIALKOWSKI, W. Dreams versus reality: a view from both sides of the gap: manufacturing excellence with come only through engineering excellence. *Pulp & Paper Canada*, Southam, v. 94, n. 11, p. 19–27, 1993. Citado na página 16.
- BILLINGS, S.; FAKHOURI, S. Non-linear system identification using the hammerstein model. *International Journal of Systems Science*, Taylor & Francis, v. 10, n. 5, p. 567–578, 1979. Citado na página 27.
- CAPACI, R. B. di; SCALI, C. Review and comparison of techniques of analysis of valve stiction: From modeling to smart diagnosis. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, 2018. Citado na página 23.

- CHOUDHURY, A. A. S.; SHAH, S. L.; THORNHILL, N. F. *Diagnosis of process nonlinearities and valve stiction: data driven approaches*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 16, 18, 20, 23 e 28.
- CHOUDHURY, M. S. et al. Automatic detection and quantification of stiction in control valves. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 14, n. 12, p. 1395–1412, 2006. Citado 6 vezes nas páginas 16, 19, 20, 22, 23 e 24.
- CHOUDHURY, M. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L. Modelling valve stiction. *Control engineering practice*, Elsevier, v. 13, n. 5, p. 641–658, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 12, 17, 18 e 24.
- CUADROS, M. A. d. S. L. Quantificação e compensação de atrito em válvulas de controle pneumáticas. Universidade Federal do Espírito Santo, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 17, 48, 49 e 52.
- CUADROS, M. A. d. S. L.; MUNARO, C. J.; MUNARETO, S. An improved algorithm for automatic quantification of valve stiction in flow control loops. In: IEEE. *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 173–178. Citado na página 23.
- CUADROS, M. A. d. S. L.; MUNARO, C. J.; MUNARETO, S. Improved stiction compensation in pneumatic control valves. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 38, p. 106–114, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 18.
- DESBOROUGH, L.; NORDH, P.; MILLER, R. Process out of control. *InTech International Journal for Measurement Control*, v. 48, n. 8, p. 52–56, 2001. Citado na página 16.
- EHRICH, N. E. *An investigation of control strategies for friction compensation*. [S.l.], 1991. Citado na página 47.
- ENTECH. Control valve dynamic specification. *Version 3.0*, 1998. Citado na página 17.
- ESKINAT, E.; JOHNSON, S. H.; LUYBEN, W. L. Use of hammerstein models in identification of nonlinear systems. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 37, n. 2, p. 255–268, 1991. Citado na página 27.
- GANDER, W.; STREBEL, R.; GOLUB, G. H. Fitting of circles and ellipses least squares solution. In: *SVD and Signal Processing III*. [S.l.]: Elsevier, 1995. p. 349–356. Citado na página 24.
- HÄGGLUND, T. A friction compensator for pneumatic control valves. *Journal of process control*, Elsevier, v. 12, n. 8, p. 897–904, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 20, 47, 49, 50, 51 e 52.
- HÄGGLUND, T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 17, n. 6, p. 489–499, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 48.
- HE, Q. P.; WANG, J. Valve stiction quantification method based on a semiphysical valve stiction model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 53, n. 30, p. 12010–12022, 2014. Citado na página 23.

- HE, Q. P. et al. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 46, n. 13, p. 4549–4560, 2007. Citado na página 29.
- HORCH, A. A simple method for detection of stiction in control valves. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 7, n. 10, p. 1221–1231, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- HORCH, A. Benchmarking control loops with oscillations and stiction. In: *Process control performance assessment*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 227–257. Citado na página 16.
- HORCH, A.; ISAKSSON, A. J. Detection of valve stiction in integrating processes. In: IEEE. *Control Conference (ECC), 2001 European*. [S.l.], 2001. p. 1327–1332. Citado na página 19.
- IVAN, L. Z. X.; LAKSHMINARAYANAN, S. A new unified approach to valve stiction quantification and compensation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 48, n. 7, p. 3474–3483, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 16, 21, 48, 49 e 55.
- JELALI, M. Estimation of valve stiction in control loops using separable least-squares and global search algorithms. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 18, n. 7-8, p. 632–642, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 16, 20, 23, 24 e 29.
- JELALI, M.; HUANG, B. *Detection and diagnosis of stiction in control loops: state of the art and advanced methods*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 44.
- KANO, M. et al. Practical model and detection algorithm for valve stiction. In: *IFAC symposium on dynamics and control of process systems*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 5–7. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.
- KAYIHAN, A.; III, F. J. D. Friction compensation for a process control valve. *Control engineering practice*, Elsevier, v. 8, n. 7, p. 799–812, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 47.
- LAKSHMINARAYANAN, S.; SHAH, S. L.; NANDAKUMAR, K. Identification of hammerstein models using multivariate statistical tools. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 50, n. 22, p. 3599–3613, 1995. Citado na página 27.
- LEE, K. H.; REN, Z.; HUANG, B. Novel closed-loop stiction detection and quantification method via system identification. In: *ADCONIP Conference, Jasper, Canada*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 4–7. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.
- LJUNG, L. *System identification-theory for the user* 2nd edition ptr prentice-hall. *Upper Saddle River, NJ*, 1999. Citado na página 26.
- MIAO, T.; SEBORG, D. E. Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops. In: IEEE. *Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1999. v. 1, p. 359–364. Citado na página 16.
- NARENDRA, K.; GALLMAN, P. An iterative method for the identification of nonlinear systems using a hammerstein model. *IEEE Transactions on Automatic control*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 546–550, 1966. Citado na página 27.

- OLSSON, H. Control systems with friction. *PhD Theses*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH), 1996. Citado na página 17.
- ORDYS DAMIEN UDUEHI, M. A. J. A. *Process Control Performance Assessment: From Theory to Implementation*. 1. ed. Springer, 2007. (Advances in Industrial Control). ISBN 9781846286230,1846286239. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=2D58FF48C04A692C272FDD5BDA1961B8>>. Citado na página 40.
- QI, F.; HUANG, B. Estimation of distribution function for control valve stiction estimation. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 21, n. 8, p. 1208–1216, 2011. Citado na página 16.
- ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Valve friction and nonlinear process model closed-loop identification. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 21, n. 4, p. 667–677, 2011. Citado na página 23.
- RUEL, M. Stiction: The hidden menace. *Control Magazine*, v. 13, n. 11, p. 1–11, 2000. Citado na página 17.
- SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Stiction compensation in process control loops: A framework for integrating stiction measure and compensation. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 44, n. 24, p. 9164–9174, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 24, 28 e 48.
- SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Approaches for efficient stiction compensation in process control valves. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 32, n. 1-2, p. 218–229, 2008. Citado na página 48.
- SRINIVASAN, R. et al. Control loop performance assessment. 2. hammerstein model approach for stiction diagnosis. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 44, n. 17, p. 6719–6728, 2005. Citado 10 vezes nas páginas 16, 20, 21, 23, 25, 27, 28, 47, 51 e 52.
- 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*, Wiley Online Library, v. 17, n. 7-9, p. 625–634, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 28.
- STOICA, P. On the convergence of an iterative algorithm used for hammerstein system identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 967–969, 1981. Citado na página 27.
- STOICA, P.; SÖDERSTROM, T. Instrumental-variable methods for identification of hammerstein systems. *International Journal of Control*, Taylor & Francis, v. 35, n. 3, p. 459–476, 1982. Citado na página 27.
- SUBCOMMITTEE, I. Process instrumentation terminology technical report ansi/isa-s51.1-1979. *Instrument Society of America*, 1979. Citado na página 17.
- TAHA, O.; DUMONT, G. A.; DAVIES, M. S. Detection and diagnosis of oscillations in control loops. In: IEEE. *Decision and Control, 1996., Proceedings of the 35th IEEE Conference on*. [S.l.], 1996. v. 3, p. 2432–2437. Citado na página 16.

WANG, Y.; WANG, D.; CHAI, T. Modeling and control compensation of nonlinear friction using adaptive fuzzy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 23, n. 8, p. 2445–2457, 2009. Citado na página 23.

ZABIRI, H.; MAULUD, A.; OMAR, N. Nn-based algorithm for control valve stiction quantification. *WSEAS Trans. Syst. Control*, v. 4, n. 2, p. 88–97, 2009. Citado na página 23.