

MÉTODO GAIN SCHEDULING APLICADO AO CONTROLE DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO

PEDRO ANDRÉ NOGUEIRA SOUZA DE OLIVEIRA VALE*, FÁBIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAÚJO*

**Departamento de Engenharia de Computação e Automação
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil*

Emails: pedroandrensovale@hotmail.com, meneghet@dca.ufrn.br

Abstract— Gain Scheduling is one of the most popular approaches to a non-linear control, which has been successfully applied in many different areas. The use of Gain Scheduling allows the controller to respond rapidly to changes in operating conditions, in addition to the use of linear design virtual tools in non-linear problems. This paper aims to test, compare and investigate the advantages and disadvantages of using Gain Scheduling PID for the control of a debutanizer column. To tune the controllers, a trial and error strategy was performed.

Keywords— Gain Scheduling, PID, Debutanizer Column.

Resumo— Este trabalho tem como objetivo melhorar o controle da temperatura e da vazão de refluxo de um processo de destilação. A coluna de destilação que foi simulada no software HYSYS[®] é uma coluna debutanizadora que apresenta não linearidades acentuadas. Assim, foi investigado, testado e comparado o uso de diferentes técnicas de *Gain Scheduling* em junção com a técnica de *anti-Windup Integrator Clamping*. Para a sintonia dos controladores foi realizada uma estratégia empírica.

Palavras-chave— Gain Scheduling, PID, Coluna Debutanizadora.

1 Introdução

Sistemas de controle são utilizados diuturnamente na sociedade moderna, e têm as mais diversas aplicações, que vão do controle da temperatura dentro de um automóvel ao controle de complexas usinas (Ogata and Severo, 1998; Bolton, 1995). Em processos industriais existe a preocupação de assegurar que o resultado permaneça dentro de uma especificação predeterminada. Para conseguir isto é necessário algum nível de procedimento de controle, sendo o PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) a técnica de controle mais utilizada (Åström and Hägglund, 1995).

A razão da popularidade do algoritmo PID deve-se à facilidade de implementação, simplicidade nos ajustes de seus parâmetros (K_p , K_i , K_d), baixo custo, eficiência, eficácia e ao fato de muitos equipamentos de controle na indústria possuírem o algoritmo PID já disponível (de Campos and Teixeira, 2006; Odili et al., 2017). O controlador PID foi projetado para levar em conta as relações lineares com as variáveis a serem controladas, o que causa a sua dependência em relação aos parâmetros do objeto que se pretende controlar. Por consequência, o controlador PID tem a eficiência reduzida, quando aplicado a sistemas que possuam fortes não linearidades, atrasos de transporte e parâmetros variantes no tempo (Almeida et al., 2002).

Em sistemas com não linearidades acentuadas, é possível melhorar significativamente o desempenho do controlador PID combinando-o com algumas estratégias de *Gain Scheduling* (GS) (Åström and Hägglund, 2001). A abordagem

Gain Scheduling é provavelmente a técnica de controle de sistemas não lineares mais popular, com aplicação eficiente nas mais diversas áreas (Leith and Leithead, 2000). Técnicas de GS podem alterar os parâmetros dos controladores de acordo com a condição de operação do sistema ou até mesmo de acordo com tempos predefinidos (Rugh and Shamma, 2000).

Antes de 1990, alguns trabalhos científicos mencionavam as múltiplas aplicações do GS (Källström et al., 1979), porém os tratamentos teóricos de grande relevância somente começaram a surgir na década de 1990 (Shamma and Athans, 1990; Rugh, 1991). Na atualidade, o GS continua com diversas aplicações (Pratama et al., 2016; Larrazabal and Peñas, 2016; van der Weijst et al., 2018).

Em (Pratama et al., 2016) foi utilizado GS-PID com *anti-Windup* do tipo *Back Calculation* para realizar o controle de um tanque de água. Nesse trabalho, o GS obteve desempenho superior quando comparado com um PID convencional, mostrando que o controlador GS-PID se adaptou as não linearidades do sistema.

O objetivo deste artigo é propor uma técnica de controle que torne mais eficiente e eficaz o processo de destilação de uma coluna debutanizadora, investigando-se o uso de diferentes técnicas de GS para lidar com as não linearidades desse processo.

2 Coluna Debutanizadora

Uma coluna debutanizadora tem como função a produção do gás liquefeito de petróleo (GLP) dentro de uma especificação predeterminada. Essa

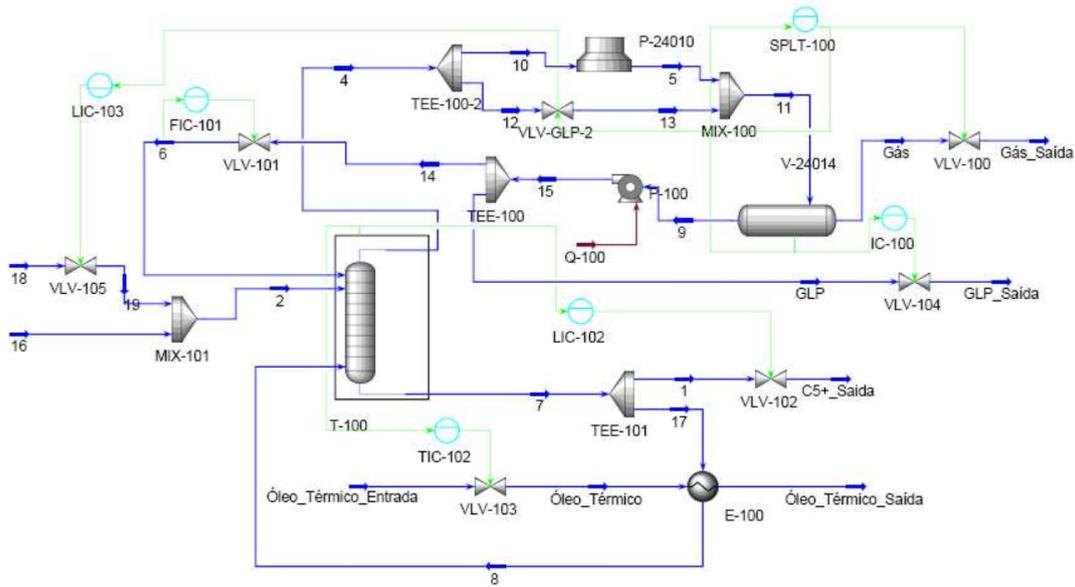


Figura 1: Coluna Debutanizadora Simulada.

coluna é alimentada com líquido de gás natural (LGN), que é basicamente C3+ (propano e mais pesados) e uma pequena quantidade de C2 (etano), que é separado por destilação, em duas saídas. Na saída do topo é retirado o GLP, composto na maior parte por C3 e C4, e na saída do fundo é retirado C5+ (pentano e mais pesados). Neste trabalho, a coluna debutanizadora foi simulada, com a utilização do software HYSYS[®], que é um simulador de processos químicos usado para modelar matematicamente processos que vão desde as operações unitárias até às refinarias completas. A coluna implementada já foi utilizada em diferentes trabalhos (Araújo Júnior, 2007; Linhares, 2010), na qual é simulado o processo real de destilação contínua. A coluna simulada possui as mesmas configurações de uma coluna real, como, por exemplo, o mesmo número de pratos (28) e o fato da carga recebida advir da saída do fundo de uma coluna deetanizadora.

A Figura 1 mostra o diagrama esquemático da coluna debutanizadora que, na sua parte inferior, a vazão de resíduo se bifurca em duas linhas. Uma linha se destina à produção de C5+ e a outra alimenta o refeedor (E-100) de C5+, que depois de vaporizado realimenta a coluna debutanizadora. A vazão de óleo térmico utilizado para aquecer o fluido (C5+) é controlado pelo TIC-102, mediante manipulação da válvula VLV-103.

A vazão que passa pela saída do topo da coluna debutanizadora é enviada para um vaso acumulador de condensado, podendo passar ou não pelo condensador a ar (P-24010). Para que a vazão passe direto para o vaso de condensado, sem passar pelo condensador, isso depende da atuação do controlador de pressão em *split range* (SPLT-100) sobre a válvula de *bypass* VLV-GLP-2. Uma

parte do fluido do vaso de condensado, o GLP, é enviada para a comercialização e outra parte volta para a coluna através da linha de refluxo. O refluxo é controlado pelo FIC-101 que manipula a abertura da válvula VLV-101. Assim, tanto a atuação do TIC-102 quanto a do FIC-101 influenciam no perfil de temperatura da coluna debutanizadora. A depender da pressão no vaso de condensado, parte do GLP pode ser enviado para queima, através da linha Gás-Saída (ver Figura 1), como medida de segurança. Esse processo é chamado de *flare*. A vazão de alívio estará de acordo com a abertura da válvula VLV-100 que é controlada pela atuação do SPLT-100.

$$u(k) = u(k-1) + K_c \left[e(k) - e(k-1) + \frac{h}{T_i} e(k) \right] \quad (1)$$

Em que se considera:

- $u(k)$ - saída do controlador no instante k ;
- $e(k)$ - valor do sinal do erro no instante k ;
- K_c - ganho proporcional do controlador;
- T_i - tempo integrativo do controlador;
- h - período de amostragem.

Os controladores FIC-101 e TIC-102 são PI's com a implementação do algoritmo em velocidade, como apresentado na Eq. (1).

3 Fundamentação Teórica

3.1 Técnica de anti-Windup para a estrutura PID

Em praticamente todos os processos industriais, o sinal de controle tem uma restrição de amplitude

que pode piorar o desempenho do sistema. A ocorrência de *Windup* faz com que o termo integral atinja valores elevados sem qualquer efeito sobre a saída da planta, conseqüentemente, torna-se necessário um erro com o sinal oposto ao que provocou a ocorrência do *Windup* durante um longo período de tempo para que o termo integral volte ao estado estacionário, isso produz elevado *overshoot* e um longo tempo de acomodação (Hadade Neto et al., 2005).

Técnicas de *anti-Windup* são comumente utilizadas para se evitar o *Windup*, e para melhorar o desempenho do controle. Neste trabalho foi utilizada a técnica de integração condicional, também conhecida como *Integrator Clamping*, com a finalidade de diminuir o *overshoot* e o tempo de acomodação. Essa técnica consiste em interromper a integração quando atendidas certas condições (Hadade Neto et al., 2005). A condição aqui adotada é desligar a ação integral quando o erro ultrapassar um valor predeterminado, i.e., quando $|e(k)| > \bar{e}$.

3.2 Gain Scheduling

Muitos métodos de controle são descritos como *Gain Scheduling* por apresentarem um procedimento de "dividir para conquistar", isto é, uma transformação de um problema de controle não linear em uma série de sub-problemas lineares. Esse procedimento foi a fonte da popularidade dos métodos GS, pois com isso tornou-se possível a utilização de métodos de controle linear já bem estabelecidos em problemas não lineares (Leith and Leithead, 2000). Alguns exemplos de controladores que podem ser interpretados como GS são os que tem ganhos permutados de acordo com a condição de operação ou até mesmo de acordo com tempos predefinidos (Rugh and Shamma, 2000).

De forma geral, um controlador *Gain Scheduling* para uma planta não linear pode ser realizado através de um procedimento em quatro etapas (Rugh and Shamma, 2000):

- Calcular modelos lineares com parâmetros variantes para planta;
- Projetar controladores lineares para os modelos lineares;
- Implementação de um grupo de controladores de modo que os ganhos sejam variados de acordo com o valor atual da variável auxiliar;
- Avaliação do desempenho.

A Figura 2 mostra um esquema simplificado de um *Gain Scheduling* PID, onde uma função de ganhos tem a informação de uma variável mensurável (variável auxiliar), e com isso altera os parâmetros do controlador PID em busca de realizar um melhor controle do processo.

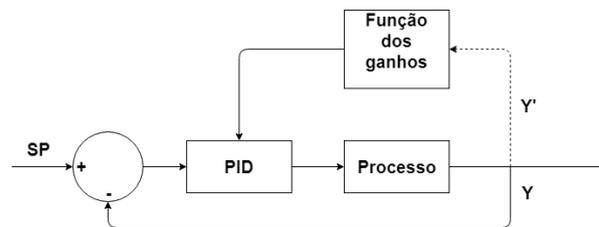


Figura 2: Esquema básico de um GS-PID.

A escolha de uma variável auxiliar que reflita bem as mudanças dinâmicas do processo é de grande importância para um projeto de *Gain Scheduling* (Rugh and Shamma, 2000; Haugen, 2004).

3.2.1 Síntese de Controladores

Para efetuar a terceira etapa de um projeto de controlador *Gain Scheduling*, etapa supracitada, é necessária a realização da síntese dos controladores baseado em GS. Duas estratégias clássicas são o chaveamento de controladores e a interpolação dos coeficientes dos controladores (Haugen, 2004; Berruezo, 2016). O chaveamento de controladores consiste em ter um controlador para cada faixa de operação, de modo que, quando a variável auxiliar transitar de uma faixa para outra aconteça a troca dos controladores. Já a síntese que utiliza a interpolação dos coeficientes modifica os parâmetros dos controladores, na medida em que a variável auxiliar se altera. A Figura 3 apresenta o ganho de um controlador em função da variável auxiliar, para as duas estratégias.

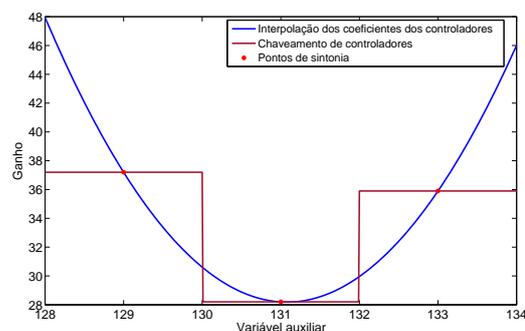


Figura 3: Ganho de um controlador em função da variável auxiliar.

3.3 Avaliação do Desempenho

O desempenho de um sistema de controle está diretamente ligada com a capacidade do sistema lidar com as divergências entre as variáveis controladas e as referências. Essas divergências podem ser quantificadas em um único número, esse sendo conhecido como índice de desempenho (Souza, 2007; Knop, 2011).

$$ISE = \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (2)$$

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e(k)| \quad (3)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k) \quad (4)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u(k) - \xi_1]^2 \quad (5)$$

$$\kappa = \sum_{k=1}^N |\Delta u(k)| \quad (6)$$

Em que:

- $u(k)$ - saída do controlador no instante k ;
- $e(k)$ - valor do sinal do erro no instante k ;
- $\Delta u(k)$ - variação da saída do controlador no instante k .

Alguns índices de desempenho clássicos para analisar o controle são ISE (*Integral Square Error*) e IAE (*Integral Absolute Error*), Eqs. (2) e (3). A avaliação do sinal de controle é possível utilizando os índices κ e ξ_2 , Eqs. (5) e (6), com ξ_2 representando a variância do sinal de controle.

4 Proposta de Controle

O intuito deste trabalho é buscar contribuir para a realização de um controle mais efetivo da coluna debutanizadora. Para isso foram utilizados métodos de GS-PID para controlar processos não lineares ocorrentes no processo de destilação da coluna debutanizadora. O primeiro passo foi realizar a comunicação dos softwares HYSYS[®] e MATLAB[®] para a implementação desses métodos. O ponto de partida para utilizar *Gain Scheduling* foi realizar testes na coluna para observar quais variáveis alteravam significativamente a dinâmica do processo. A corrente de alimentação simulada foi considerada que advém de uma coluna deetanizadora, com vazão e composição sofrendo pequenos distúrbios que não impactam consideravelmente a dinâmica do processo. A variável que mais impactou na variação da dinâmica foi a temperatura da coluna debutanizadora.

Após a definição da variável auxiliar foi considerado que o operador da coluna possa ter interesse de variar até em 3 °C a temperatura da

coluna para modificar a composição do GLP. A temperatura está diretamente ligada com a qualidade do produto, como pode ser visto na Figura 4. A coluna real opera com a temperatura no prato sensível em torno de 131 °C, sabendo disso, foram realizadas sintonias para as temperaturas 131 °C, 133 °C e 129 °C para os controladores FIC-101 e TIC-102.

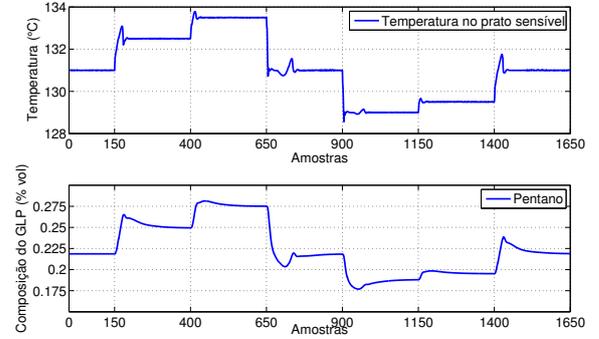


Figura 4: Relação da temperatura com a composição do GLP.

4.1 Sintonia dos Controladores

Foram realizadas as sintonias dos controladores para os pontos de operação, de forma empírica, utilizando o algoritmo expresso na Figura 5.

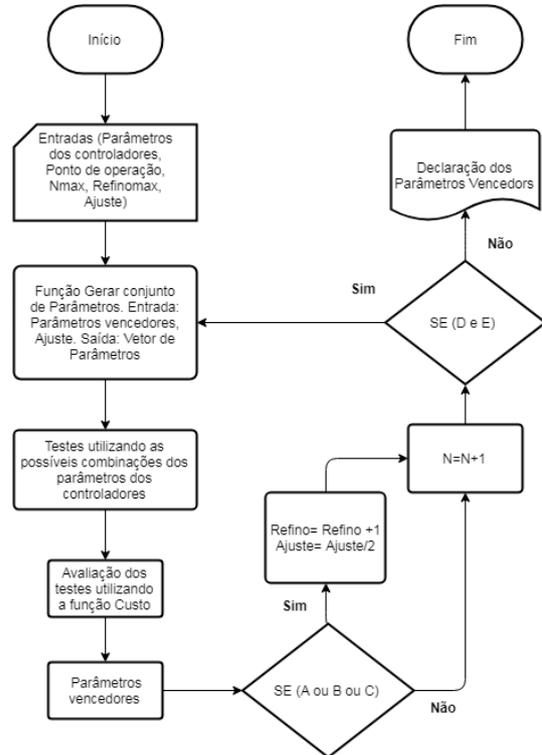


Figura 5: Fluxograma utilizado para a sintonia.

No qual:

- Parâmetros dos controladores - K_c e T_i dos controladores FIC-101 e TIC-102;
- N - Número de interações;
- Nmax - Número máximo de interações;
- Refinomax - Número máximo de vezes em que se pretende reduzir o ajuste;
- Ajuste - Valor utilizado para gerar um vetor dos parâmetros;
- A - Parâmetros Vencedores(N) == Parâmetros Vencedores da interação passada(N-1);
- B - N == Nmax/2 e Refino == Refino inicial;
- C - Custo(N)/Custo(N-1) > 0,95;
- D - N <= Nmax;
- E - Refino <= Refinomax.

A função para gerar o conjunto dos parâmetros é, basicamente, receber um valor de parâmetro do controlador e retornar um vetor na forma $\vec{x} = [x; x.(1 - ajuste); x.(1 + ajuste)]$, onde x é o parâmetro fornecido. Isso permite a criação de vetores dos parâmetros, mediante a variação percentual ($100.ajuste$)%. Após a criação desses vetores são realizados os testes para as diferentes combinações dos parâmetros dos controladores.

O teste realizado consistiu em colocar o sistema para seguir referências em torno do ponto de operação e mensurar o desempenho dos controladores.

$$Custo = a.ISE + b.IAE + c.\kappa_{tic} + d.\kappa_{fic} \quad (7)$$

Para avaliar a eficiência dos controladores foi utilizada a função *Custo* apresentada na Eq. (7).

Para o cálculo da função *Custo* foram utilizados os índices ISE e IAE, Eqs. (2) e (3) do controle da temperatura e o κ , Eq. (6) dos controladores TIC-102 e FIC-101. As constantes a , b , c e d foram escolhidas após a realização de um teste, de maneira que o *Custo* fosse inicialmente composto por 40% de ISE, 40% de IAE, 10% de κ_{tic} e 10% de κ_{fic} .

Após as sintonias foram obtidos seis controladores PI's que estão nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Parâmetros do TIC-102.

	K_c	T_i
129 °C	37,2	70,7
131 °C	28,2	79,4
133 °C	35,9	67,9

Tabela 2: Parâmetros do FIC-101.

	K_c	T_i
129 °C	0,41	0,37
131 °C	0,56	0,46
133 °C	0,65	0,48

4.2 Síntese dos controladores

Para realizar a síntese dos controladores foram utilizadas as estratégias de chaveamento de controladores e interpolação dos coeficientes. O chaveamento empregado neste estudo foi feito considerando que os pontos sintonizados estão no centro de uma faixa de operação e que o tamanho da faixa é de 2 °C. Assim os PI's sintonizados para a temperatura 129 °C atuam enquanto essa estiver entre 128 °C e 130 °C e assim por diante. Também foram utilizadas zonas mortas nas fronteiras das faixas com o objetivo de evitar chaveamentos de alta frequência (*chattering*). Para a interpolação dos coeficientes dos controladores foi utilizada a interpolação polinomial de Lagrange com histerese. A histerese foi utilizada para evitar a constante atualização dos parâmetros, em momentos em que o erro fosse insignificante.

5 Resultados

Nesta seção será comparada as técnicas de *Gain Scheduling* com os PI's já existentes na planta real, cujos valores dos parâmetros estão na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros dos PI's.

	FIC-101	TIC-102
K_c	0,63	17,5
T_i	0,52	49,3

Para analisar a eficiência dos controladores foram utilizados os índices de desempenho IAE e ISE. A Tabela 4 expõe o resultado quando utilizadas as diferentes técnicas de controle para um problema onde existam perturbações no *setpoint* da temperatura, o que se denomina de problema servo.

Tabela 4: Desempenho do TIC-102.

	IAE	ISE
PI	100,00	54,76
PI c/ <i>anti-Windup</i>	90,44	45,13
GS-Chaveamento	67,46	41,70
GS-C. c/ <i>anti-Windup</i>	68,05	42,63
GS-Interpolação	62,13	33,17
GS-I. c/ <i>anti-Windup</i>	66,66	39,29

A técnica que melhor se adequou ao problema servo da temperatura em questão foi a do *Gain*

Scheduling, com utilização da síntese por interpolação dos coeficientes. É importante notar a melhora significativa do PI quando utilizado junto com a técnica de *anti-Windup*, conforme demonstrado na Figura 6. Isso aconteceu devido a diminuição considerável dos *overshoots* e dos tempos de acomodação.

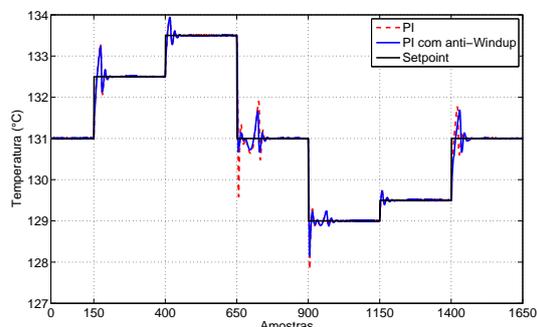


Figura 6: Comparativo entre PI com e sem *anti-Windup*.

Os controladores *Gain Scheduling* quando utilizados com *anti-Windup* apresentaram uma piora no desempenho, o que pode ser visto na Figura 7. O uso do *anti-Windup* causou a diminuição dos *overshoots*, mas, em contrapartida, deixou a resposta mais lenta.

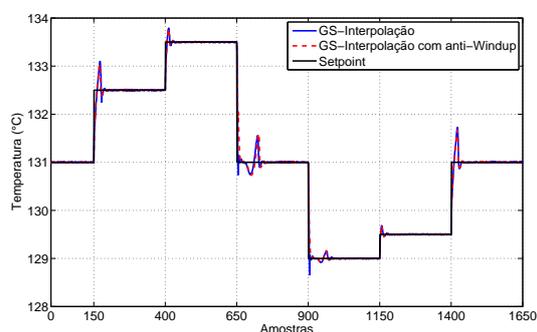


Figura 7: Comparativo entre GS-Interpolação com e sem *anti-Windup*.

A Figura 8 expõe as respostas para os controladores GS por interpolação e os PI's já existentes nas plantas. Com base na Figura 8 e na Tabela 4 é possível notar uma melhora substancial ao utilizar *Gain Scheduling* para o controle da temperatura.

A Tabela 5 exhibe o resultado quando utilizado as diferentes técnicas de controle para um problema onde existe perturbação na carga da vazão de refluxo ocasionado pelas mudanças no *setpoint* da temperatura, problema esse denominado de problema regulatório.

O melhor resultado foi obtido pelo controlador *Gain Scheduling* com *anti-Windup*. A utilização do *anti-Windup* gerou menores perturbações na malha vazão devido aos menores *overshoots* e as

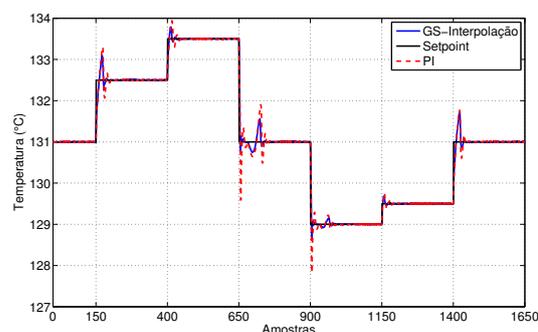


Figura 8: Comparativo entre GS-interpolação e o PI.

respostas menos abruptas na malha de temperatura, como se observa nas Figuras 6 e 7.

Tabela 5: Desempenho do FIC-101.

	IAE	ISE
PI	12,46	1,36
PI c/ <i>anti-Windup</i>	10,22	0,82
GS-Chaveamento	7,23	0,50
GS-C. c/ <i>anti-Windup</i>	6,13	0,27
GS-Interpolação	7,35	0,56
GS-I. c/ <i>anti-Windup</i>	5,81	0,23

A Figura 9 apresenta o comportamento da vazão de refluxo quando o sistema é submetido à perturbação causada pela variação de temperatura.

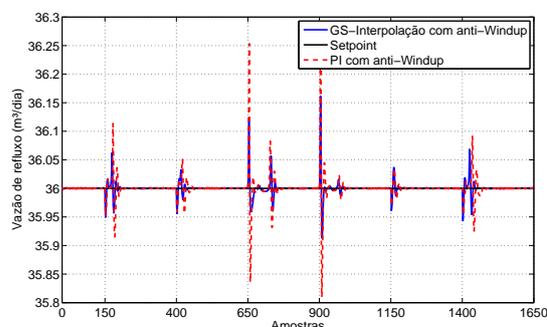


Figura 9: Comparativo entre GS-interpolação e PI, ambos com o uso de *anti-Windup*.

É interessante notar a relação do comportamento da vazão de refluxo com a temperatura. Quando a temperatura está aumentando (ver Figura 8) acontece uma perturbação na vazão de refluxo que provoca uma queda na vazão. Essa baixa na vazão auxilia no aumento da temperatura da coluna debutanizadora. O contrário também acontece quando a temperatura está diminuindo. Mesmo que na sintonia dos controladores, a função *Custo* - Eq. 7 - não tenha utilizado índices que avaliassem diretamente o controle da vazão, ao sintonizar o TIC-102 e FIC-101 para reduzir a

função *Custo*, nota-se que também foi melhorado o controle da vazão de refluxo, já que um controle eficiente da malha de vazão impacta positivamente o desempenho do controle da temperatura. Isto explica a eficiência superior dos controladores GS em relação aos controladores PI mostrado na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta os resultados da avaliação do sinal de controle gerado pelo TIC-102 quando utilizadas diferentes estratégias de controle.

Tabela 6: Avaliação do sinal do TIC-102.

	ξ_2	κ
PI	25,43	632,94
PI c/ <i>anti-Windup</i>	16,71	542,54
GS-Chaveamento	22,54	623,50
GS-C. c/ <i>anti-Windup</i>	18,46	586,83
GS-Interpolação	19,21	593,51
GS-I. c/ <i>anti-Windup</i>	16,99	568,35

É possível observar que o uso da técnica de *anti-Windup* reduziu a dispersão do sinal de controle, i.e., causou uma menor variação do sinal de controle. Essa redução pode aumentar a vida útil da válvula manipulada pelo controlador e, consequentemente, ocasionar um número menor de paralisações do processo.

Os controladores que apresentaram os melhores resultados foram o PI com *anti-Windup* e o controlador GS com a síntese de interpolação dos coeficientes em junção com a técnica de *anti-Windup*. O comportamento do sinal de controle pode ser visto na Figura 10.

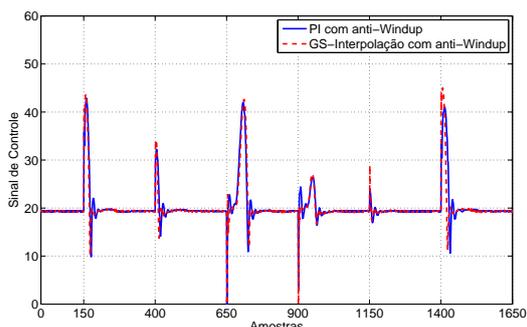


Figura 10: Sinal de Controle gerado pelo TIC-102.

O controlador GS gerou maiores picos do sinal de controle, porém, a estabilização do sinal aconteceu de forma mais rápida do que quando utilizado o PI.

A Tabela 7 informa a avaliação feita do sinal gerado pelo FIC-101. Constata-se que as estratégias que utilizaram *Gain Scheduling* foram superiores às que utilizaram somente o PI.

Tabela 7: Avaliação do sinal do FIC-101.

	ξ_2	κ
PI	1,13	155,80
PI c/ <i>anti-Windup</i>	0,82	125,60
GS-Chaveamento	0,61	89,19
GS-C. c/ <i>anti-Windup</i>	0,50	76,75
GS-Interpolação	0,61	89,30
GS-I. c/ <i>anti-Windup</i>	0,46	74,12

Os melhores resultados foram obtidos pelos controladores GS quando utilizados com o *anti-Windup*. O comportamento do sinal de controle do FIC-101 quando utilizadas as técnicas de GS são bastantes semelhantes, como pode ser visto na Figura 11.

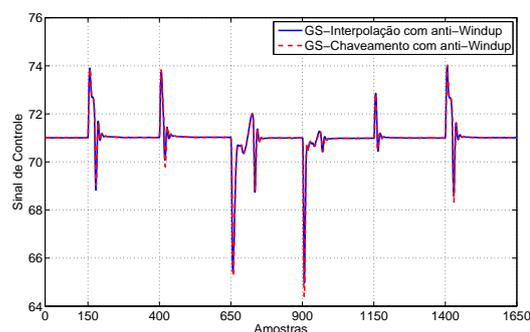


Figura 11: Sinal de Controle gerado pelo FIC-101.

6 Conclusões

Este trabalho mostrou o grande potencial do uso de controladores *Gain Scheduling* PI's, tanto por chaveamento quanto por interpolação dos ganhos, ao controlar o funcionamento de uma coluna debutanizadora de forma mais eficiente do que o controlador PI. O controlador PI, com ou sem *anti-Windup*, mostrou ser inferior aos controladores GS nos testes realizados para o controle das malhas de temperatura e da vazão de refluxo. O PI com *anti-Windup* só se mostrou superior na avaliação do sinal de controle do TIC-102.

O método de sintonia utilizado se mostrou eficaz, visto que a eficiência dos controladores GS está diretamente ligada com a qualidade da sintonia para os pontos de operação.

O *Gain Scheduling*, ao utilizar a síntese por interpolação dos ganhos com *anti-Windup*, apresentou os melhores resultados, mostrando assim que os controladores se adaptaram bem as não linearidades da planta e que esse método pode ser fortemente indicado para se realizar um controle eficiente e eficaz de uma coluna debutanizadora.

Agradecimentos

Agradecemos a UFRN pelo incentivo e apoio dado a esta pesquisa.

Referências

- Almeida, O. d. M. et al. (2002). *Controle PID auto-ajustável, inteligente e preditivo*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Araújo Júnior, J. M. d. (2007). *Técnicas de inteligência artificial para a geração dinâmica de set points para uma coluna de destilação*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Åström, K. J. and Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning*, Vol. 2, Isa Research Triangle Park, NC.
- Åström, K. J. and Hägglund, T. (2001). The future of pid control, *Control engineering practice* **9**(11): 1163–1175.
- Berruezo, M. P. (2016). *Projeto de Controladores para Sistemas Não Lineares via Técnicas Baseadas em Escalonamento de Ganhos*, PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Bolton, W. (1995). *Engenharia de controle*, Makron Books.
- de Campos, M. C. M. M. and Teixeira, H. C. (2006). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*, Edgard Blücher.
- Hadade Neto, A. et al. (2005). *Técnicas anti-windup em estruturas de controle pid, rst e gpc*.
- Haugen, F. (2004). *PID control*, Tapir.
- Källström, C. G., Åström, K. J., Thorell, N., Eriksson, J. and Sten, L. (1979). Adaptive autopilots for tankers, *Automatica* **15**(3): 241–254.
- Knop, G. F. T. (2011). *Avaliação de desempenho baseada em variância mínima de controladores para malha de ph*, Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Larrazabal, J. M. and Peñas, M. S. (2016). Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel, *Expert Systems with Applications* **55**: 106–117.
- Leith, D. J. and Leithead, W. E. (2000). Survey of gain-scheduling analysis and design, *International journal of control* **73**(11): 1001–1025.
- Linhares, L. L. d. S. (2010). *Sistema híbrido de inferência baseado em análise de componentes principais e redes neurais artificiais aplicado a plantas de processamento de gás natural*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Odili, J. B., Kahar, M. N. M. and Noraziah, A. (2017). Parameters-tuning of pid controller for automatic voltage regulators using the african buffalo optimization, *PloS one* **12**(4): e0175901.
- Ogata, K. and Severo, B. (1998). *Engenharia de controle moderno*, Prentice Hall do Brasil.
- Pratama, S. C., Susanto, E. and Wibowo, A. S. (2016). Design and implementation of water level control using gain scheduling pid back calculation integrator anti windup, *Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), 2016 International Conference on*, IEEE, pp. 101–104.
- Rugh, W. J. (1991). Analytical framework for gain scheduling, *IEEE control systems* **11**(1): 79–84.
- Rugh, W. J. and Shamma, J. S. (2000). Research on gain scheduling, *Automatica* **36**(10): 1401–1425.
- Shamma, J. S. and Athans, M. (1990). Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants, *IEEE Transactions on Automatic Control* **35**(8): 898–907.
- Souza, D. L. (2007). *Análise do desempenho de sistemas de controle*, Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia.
- van der Weijst, R., van Loon, B., Heertjes, M. and Heemels, M. (2018). Scheduled controller design for systems with varying sensor configurations: A frequency-domain approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **26**(2): 523–534.