

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS SVD E RGA NO PROJETO DE MALHAS DE CONTROLE

¹Deborah Almeida dos Anjos; ²José Nilton Silva

^{1,2}Universidade Federal de Campina Grande, ¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Química,
¹deborah_almeida89@hotmail.com

²Unidade Acadêmica de Engenharia Química, nilton.silva@ufcg.edu.br

RESUMO: A maioria dos sistemas tem várias variáveis de medida para serem controladas e várias variáveis manipuladas, assim, o projeto de estrutura de controle deve ser executado de forma que sejam escolhidas as melhores variáveis para medição, manipulação e controle. Neste trabalho, utilizou-se as técnicas SVD (*Singular Value Decomposition*) e RGA (*Relative Gain Array*) para obtenção dos pares mais sensíveis e do emparelhamento mais adequado das variáveis de processo e manipuladas, respectivamente. Como estudo de caso utilizou-se uma unidade de tratamento de nafta, modelada em *Aspen Dynamics*® e previamente validada com dados reais de planta. Os pares T32/Qt e T35/FUEL resultantes da RGA como dois dos melhores, mostraram-se inadequados uma vez que não foi possível o controle da variável de entrada dado um distúrbio, o que pode estar relacionado a distância entre as mesmas. Para avaliação de desempenho das malhas de controle dos demais emparelhamentos, utilizou-se o índice não intrusivo ITAE (Integral do erro absoluto vezes o tempo) que apresentou valores pequenos, indicando que essas malhas estão, a princípio, bem projetadas.

Palavras-chave: Emparelhamento, estrutura de controle, malhas de controle.

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo atendimento a metas de incremento de produtividade tem gerado espaço à implementação de ações focadas na redução de perdas materiais e energéticas, conduzindo a processos mais integrados. Associado a este cenário de restrições, as exigências de mercado por produtos de maior uniformidade e a necessidade de uma maior flexibilidade para permitir transições entre produtos de características diferenciadas tornam necessário a redução sobre variabilidades de processo.

Interações são frequentemente presentes entre as várias malhas de controle em sistemas multivariáveis, Neste caso, ocorre o acoplamento cruzado no qual a entrada passa a ter influência também sobre as demais saídas, além da saída diretamente relacionada a ela. Assim, a seleção do melhor esquema de controle para emparelhamento de variáveis manipuladas e controladas não é simples. Um emparelhamento incorreto vai dificultar seriamente o desempenho do controle de malha fechada ou comprometer a estabilidade do sistema. Várias técnicas têm sido exploradas para a análise de interação em sistema multivariáveis entre elas, matriz de ganhos relativos (RGA) e decomposição em valores singulares (SVD) têm sido amplamente reconhecidas na prática.

A aplicação dessas técnicas quantitativas, permite definir os pares entre variáveis controladas e manipuladas capazes de compor uma estrutura de controle que ofereça um desempenho adequado, isto é, quantificar a controlabilidade operacional de uma determinada estrutura de controle (SVRCEK *et. al*, 2014; MORAIS *et. al*, 2013; LIU e GAO, 2012).

O objetivo desse trabalho consiste em aplicar os métodos SVD e RGA para projeto de malhas de controle utilizando o Matlab®, no intuito de aplicação em plantas de processos modeladas em *Aspen Dynamics*®.

2. PROJETO E ESTRUTURA DE CONTROLE

O projeto da estrutura de controle deve ser executado de forma que sejam escolhidas as melhores variáveis para medição, manipulação e controle. Outro ponto importante neste projeto é a definição da maneira como estas variáveis deverão estar interligadas para garantir bom desempenho e controlabilidade da planta.

As variáveis controladas, aquelas que precisam que seus valores sejam mantidos em torno de seus *set points*, são normalmente diretamente associadas aos objetivos do controle ou indiretamente relacionadas a estes objetivos e as variáveis manipuladas são aquelas que se ajustam de acordo com o sinal emitido pelo controlador. (HEIDRICH, 2004).

Para a seleção das entradas e saídas utilizam-se técnicas que informam os melhores pares que serão utilizados para implementar as malhas de controle. Dentre estas técnicas, as que tem ganhado ênfase na literatura são as *SVD* e *RGA*.

2.1 Decomposição em Valores Singulares (*SVD*)

A decomposição em valores singulares (*SVD*) é um método muito útil para a análise de sistemas multivariáveis, principalmente porquê utilizando este recurso há a possibilidade de determinar as variáveis que mais irão influenciar na operação, além de ser útil também, para determinar se um sistema estará propenso a interações na malha de controle, resultando em problemas de sensibilidade (SVRCEK *et. al*, 2006).

A *SVD* aplicada a matriz de ganho estático de um processo G ($m \times n$), consiste em expressá-la como o produto de três matrizes, como mostra a Equação 1.

$$G = USV^T \quad (1)$$

Onde G é a matriz de ganhos estáticos do processo, que pode ser obtida pela Equação 2, cujos elementos refletem a sensibilidade da variável de saída em resposta a uma variação na variável de entrada.

$$G_{ij} = \left. \frac{\partial y_i}{\partial m_j} \right|_{m_{k \neq j}} \quad (2)$$

U é uma matriz ortonormal ($m \times m$), cujas colunas representam os vetores singulares de saída pela esquerda u_i (autovetores de $G \cdot G^T$) que fornecem o sistema de coordenadas mais adequado para visualizar a sensibilidade do processo. V é uma matriz ortonormal ($n \times n$), cujas colunas representam os vetores singulares de entrada pela direita s_i (autovetores de $G^T \cdot G$) que fornecem as coordenadas mais apropriadas para a visualização da MV. $\Sigma (m \times n)$ é uma matriz diagonal de escalares não negativos σ_i denominados de valores singulares, organizados em ordem decrescente. Os valores singulares de uma matriz G são dados conforme mostra a Equação 3.

$$\sigma = +\sqrt{\lambda(G^T G)} \quad \text{ou} \quad \sigma = +\sqrt{\lambda(G \cdot G^T)} \quad (3)$$

A aplicação da técnica *SVD* para projetar malhas de controle não é suficiente para determinar os pares PV-MV mais sensíveis, dado que os ganhos em malha aberta, obtidos previamente a utilização desta metodologia, estão em unidades diferentes. Nesse contexto, entra em cena a metodologia *RGA*.

2.2 Matriz de Ganhos Relativos (RGA)

O primeiro passo para a definição da estratégia de controle a ser adotada em um sistema multimalha deve ser a determinação da RGA - Matriz de Ganhos Relativos (*Relative Gain Array*) desse sistema e a partir dela determinar os melhores pares das variáveis MV e PV.

A técnica RGA consiste em uma matriz em que seus termos são razões entre o ganho estático de cada par entrada-saída, quando o outro par se encontra em malha aberta, e o ganho

estático do mesmo par quando o outro se encontra em malha fechada (RANGEL, 2010 *apud* QUIRINO, 2012).

A RGA de uma matriz complexa não singular M , de dimensão $n \times n$, é denotada como $RGA(M)$ e definida conforme mostra a Equação 4, na qual a operação \otimes indica uma multiplicação elemento a elemento.

$$RGA(M) = M \otimes (M^{-1})^T \quad (4)$$

A RGA pode ser calculada pontualmente de acordo com a Equação 5.

$$\lambda_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{m_{ij} \det(M^{ij})}{\det(M)} \quad (5)$$

Onde $\det(M^{ij})$ indica o determinante da matriz resultante da remoção da linha i e da coluna j da matriz M e m_{ij} o elemento da linha i e coluna j .

3. METODOLOGIA

Para aplicação das técnicas foi utilizado como estudo de caso uma unidade depentanizadora de nafta, mostrada na Figura 1, na qual ocorre a separação entre os componentes contendo 5 (C5) ou menos átomos de carbono na corrente de destilado, e os maiores que C5 (mais pesados) na corrente de base. A coluna adotada é constituída por 37 estágios, com uma carga de alimentação média de $57,55 \text{ t.h}^{-1}$, composta de C1 a C11 de compostos parafínicos e aromáticos mais representativos da carga real do processo.

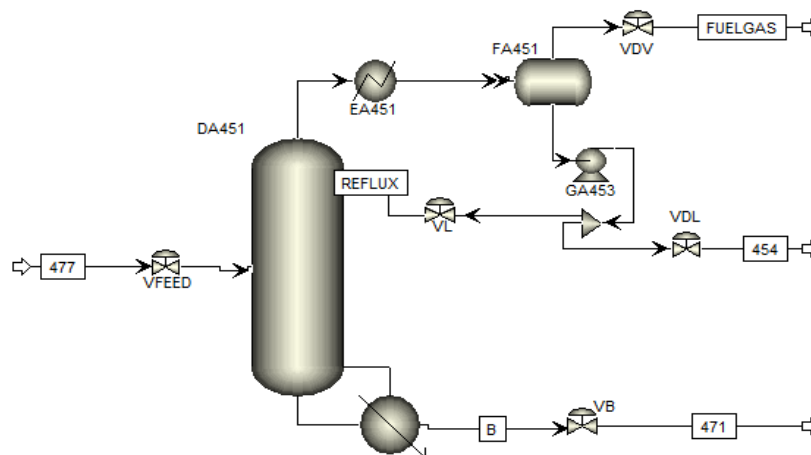


Figura 1- Representação da coluna depentanizadora em Aspen Dynamics®.

A corrente de destilado e a corrente de refluxo, identificadas como 454 e REFLUX, respectivamente, são compostas de 0,998% em massa de hidrocarbonetos até o C5. A vazão mássica do refluxo foi de $8904 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, do destilado $6555,00 \text{ kg h}^{-1}$ e da corrente de vapor (FUELGAS) 995 kg h^{-1} . A corrente do produto de base, identificada como 471, é composta de 0,999% em massa de hidrocarbonetos maiores que o C5 e uma vazão mássica de 50000 kg h^{-1} . Por fim, as cargas adotadas para o *reboiler* e o condensador foram $16,1905 \text{ GJh}^{-1}$ e $-6,0709 \text{ GJh}^{-1}$, respectivamente.

3.1 Determinação das Matrizes de Ganhos Estáticos e Relativos

Para determinar a matriz de ganhos estáticos do processo, utilizou-se a Equação 2 em sua forma estacionária. Para isto, efetuaram-se distúrbios nas variáveis de entrada, observando o comportamento das temperaturas nos estágios da coluna (variáveis de saída). A partir dos valores iniciais (sem distúrbio) e finais (com distúrbio) de cada variável manipulada, calculou-se a variação (ΔMV) entre os mesmos. De forma semelhante foi feita entre os valores estacionários iniciais das temperaturas e as respostas obtidas para cada distúrbio, encontrando-se, dessa forma, ΔPV .

A matriz de ganhos relativos é obtida a partir da razão entre o ganho em malha aberta e em malha fechada. O ganho para malha aberta é também denominado de ganho estático. Nesta matriz, aplicou-se a técnica SVD, a qual gerou as variáveis que mais influenciariam no processo. A partir destas, determinou-se o ganho em malha fechada, ou ganho dinâmico do processo, o qual consistiu em realizar um distúrbio em uma MV e observar a resposta de uma determinada PV quando as outras variáveis de processo se mantivessem constantes.

3.2 Aplicação das Técnicas SVD e RGA

A aplicação dos métodos SVD e RGA consiste, inicialmente, em escolher quais serão as variáveis controladas e manipuladas, feito isso, determinam-se os ganhos estáticos do processo. Aplica-se então o SVD a estes valores, utilizando o Matlab®, com o código apresentado na Equação 6.

$$[U \ S \ VT] = \text{svd}(K) \quad (6)$$

Este irá gerar como resultado as matrizes U , S e V^T . A análise dessas matrizes consiste em parear o componente de maior valor do vetor U_1 da matriz $U(PV)$, com o componente de maior valor do vetor V_1 da matriz $V^T(MV)$, assim como o componente de maior valor do vetor U_2 com o componente de maior valor do vetor V_2 seguindo desta forma até que todos esses componentes de todos os vetores da matriz V^T estejam pareados com seu respectivo componente da matriz U ,

O passo seguinte é determinar a matriz de ganhos relativos através do quociente dos ganhos estático e dinâmico e então aplicar o método *RGA* utilizando o código apresentado na Equação 7.

$$rga = G \cdot inv(G') \quad (7)$$

O resultado desta técnica é a chamado Matriz de Ganhos Relativos e sua interpretação consiste em parear a MV com a PV , de acordo com o valor de λ_{ij} mais próximo de 1.

Por fim, as malhas de controle são implementadas na coluna de pentanizadora do *Aspen Dynamics*® e seus desempenhos são avaliados a partir do índice não intrusivo ITAE (integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo) que quantifica o erro ocorrido por uma perturbação e é representado pela Equação 8.

$$\int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (8)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na unidade de nafta as temperaturas são limitadas a certos valores para evitar que sejam alcançadas as temperaturas críticas, em que ocorre a reação de polimerização e, conseqüente, deposição de material no refeedor (*reboiler*) reduzindo sua capacidade. Dessa forma, foram adotadas algumas variáveis para estudo da aplicação das técnicas já mencionadas (MORAES, 2004).

Possíveis Variáveis Manipuladas:

- R - vazão do refluxo (MV1);
- FUEL - vazão de produto de topo na fase vapor (MV2);

- FHreb - vazão média de aquecimento do reboiler (MV3);
- Qt - carga térmica no trocador de calor (MV5).

Possíveis Variáveis Controladas:

- As possíveis variáveis controladas escolhidas consistem no perfil de temperatura da coluna depentanizadora [T1(PV1) à T37(PV37)].

4.1 Resultado da Técnica SVD

A análise das matrizes U e V^T foi realizada de forma que o emparelhamento que produziria a malha aberta multivariável com menos interação seria aquela em que o sensor associado com o maior componente do vetor de coluna U_1 está emparelhado com a variável manipulada associada com o maior componente do vetor de coluna V_1 . O resultado para essa análise é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis que mais influenciam no processo segundo técnica SVD.

PV	MV
T1	Fhreb
T32	FUEL
T33	Qt
T35	R

A Figura 2 mostra o resultado gerado pela matriz U que informa a sensibilidade das variáveis de processo e na Tabela 2 estão os valores obtidos para a matriz V^T .

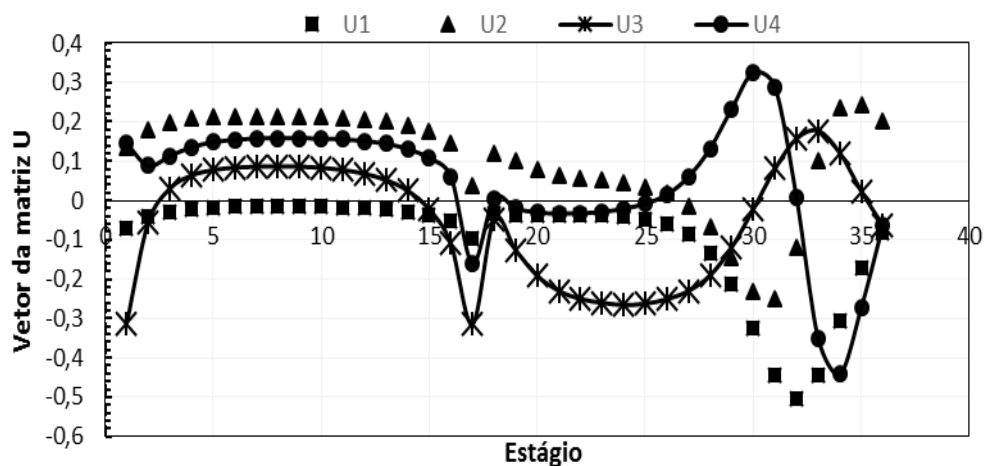


Figura 2 – Resposta obtida pelos vetores U1 a U4 da matriz U.

A partir dela, observa-se que as temperaturas mais sensíveis ao longo da coluna são as referentes aos estágios 1, 32, 33 e 35, desta forma, são as que mais irão influenciar na operação.

Tabela 2 – Valores obtidos para a matriz V^T .

Variáveis Manipuladas	Valores da matriz V^T			
R	0.0001	0.0030	0.0257	0.9997
FUEL	0.0215	-0.9997	-0.0115	0.0033
FHreb	-0.0025	-0.0116	0.9996	-0.0257
Qt	-0.9998	-0.0214	-0.0028	0.0002

4.2 Resultado da Técnica RGA

Inicialmente determinou-se os ganhos dinâmicos do processo. A partir destes e dos valores dos ganhos estáticos para as variáveis de processo encontradas após aplicação da metodologia *SVD*, calculou-se os ganhos relativos de forma a aplicar-lhe a técnica *RGA*. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de ganho relativo do processo em estudo.

	MV1	MV2	MV3	MV4
PV1	0.6353	0.2665	0.1005	-0.0022
PV2	0.0053	0.0004	0.0080	0.9864
PV3	-0.0694	0.0737	0.9791	0.0167
PV4	0.4289	0.6595	-0.0875	-0.0008

Valores de λ_{ij} compreendidos entre 0 e 1 informam que há interferência de outras malhas na malha em questão, porém, quanto mais próximo de 1 for este valor significa dizer

que mais forte é a dependência da PV com a MV. Os valores negativos de λ_{ij} indicam que o sistema é impossível de controlar devendo-se, portanto, evitar a escolha dos pares respectivos.

A Tabela 4 mostra, dessa forma, os melhores emparelhamentos PV-MV para a unidade de pentanizadora em estudo.

Tabela 4 - Pares PV-MV obtidos a partir da aplicação da RGA.

PV	MV
T1	R
T32	Qt
T33	FHreb
T35	FUEL

Observa-se que a temperatura no estágio 1 é mais sensível a variações na vazão de refluxo, assim como a temperatura no estágio 33 é mais sensível a variações na vazão média de aquecimento do *reboiler*.

Embora esta técnica tenha gerado os pares T32/ Qt e T35/ FUEL, a partir de uma análise crítica da planta é possível identificar a inviabilidade dos mesmos uma vez que as MV's estão situadas há uma distância considerável de sua respectiva PV tornando difícil seu controle.

4.3 Avaliação de Desempenho

A Figura 3 apresenta o fluxograma do processo em estudo, com as malhas de controle obtidas segundo as técnicas de estrutura de controle anteriormente utilizadas.

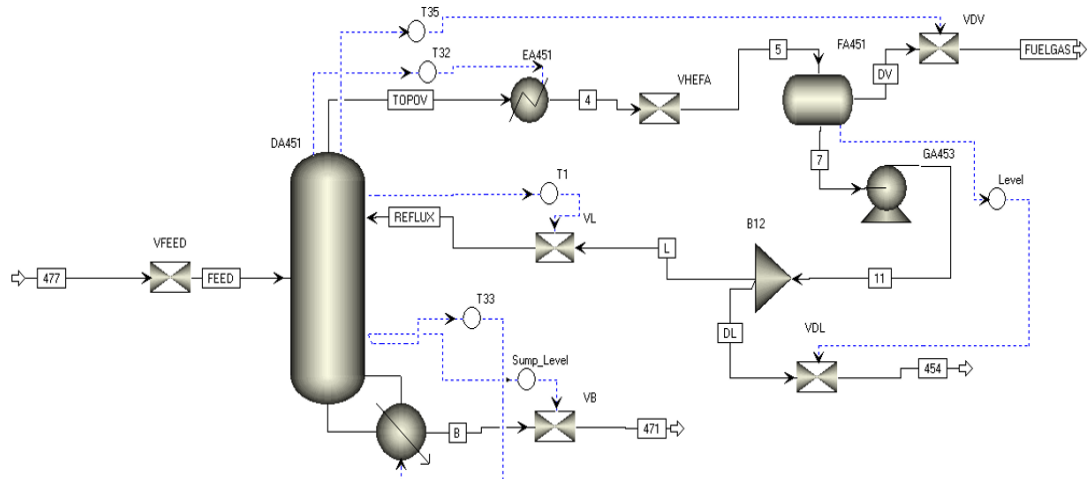


Figura 3 - Fluxograma da coluna depentanizadora e malhas de controle no Aspen Dynamics®.

A fim de calcular o índice de desempenho, efetuou-se um distúrbio no *set point* do controlador utilizado na malha de controle e observou-se o comportamento da variável de resposta ou PV.

Os parâmetros de sintonia dos controladores foram obtidos através da sintonização dos mesmos no simulador *Aspen Dynamics*®. Seus valores se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de sintonia dos controladores.

Malha	Parâmetros de sintonia		Ação
	k	τ_I	
T1 / R	86,2568	0,6235	Direta
T33 / FHreb	17,8	4,1038	Inversa

Não foi possível a sintonia dos controladores de malhas T32/ Qt e T35/ FUEL, o que reforça a inviabilidade na escolha desses pares.

Na Figura 4 a variável avaliada é a temperatura no estágio 33 da coluna depentanizadora (PV33). O valor de referência inicialmente é 173,526 °C e sofre um degrau de 0,474°C atingindo o valor de 174°C. Já na Figura 5 a variável avaliada é a temperatura no primeiro estágio da coluna (PV1). O valor de referência inicialmente é 76,5067 °C e sofre um degrau de 1,4933°C atingindo o valor de 78°C.

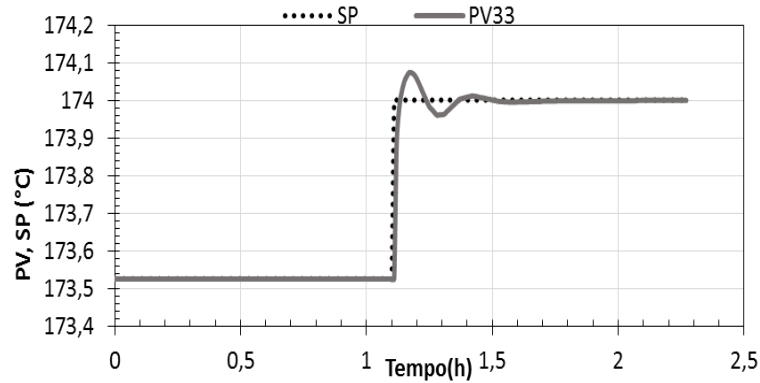


Figura 4 - Comportamento da T33 da coluna dado um degrau no set point.

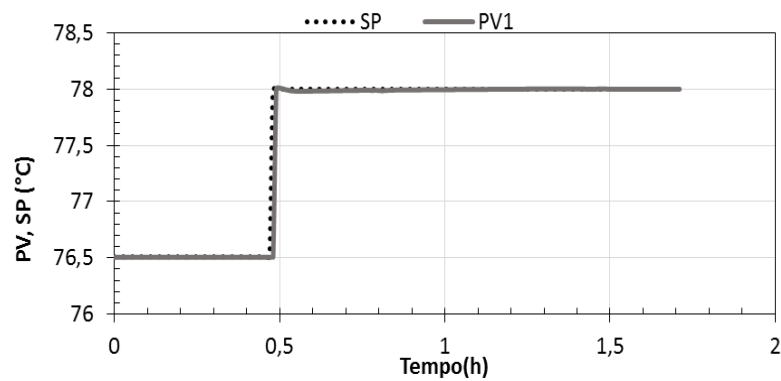


Figura 5 - Comportamento da T1 da coluna dado um degrau no set point.

A Tabela 6 mostra o índice de desempenho para as malhas consideradas na avaliação de desempenho. Valores pequenos para o ITAE são mais desejáveis e indicam emparelhamento satisfatório.

Tabela 6 – Resultado da análise de desempenho das malhas de controle.

Malha	Índice de Desempenho
	ITAE
T1 / R	1,98367
T33 / FHreb	1,20794

5. CONCLUSÕES

A aplicação das técnicas SVD e RGA foi importante de forma a consolidar os conhecimentos referentes a estrutura de controle de um processo. A partir do uso dessas metodologias foi possível observar que a técnica SVD não é suficiente para determinar o emparelhamento mais adequado. Este fato é devido a diferença de unidades existente entre as variáveis de processo, dessa forma, é necessário a aplicação da RGA já que a mesma gera resultados adimensionais possibilitando o uso de variáveis aleatórias.

Embora essas técnicas sejam muito utilizadas para projetar malhas de controle se faz necessário ter uma visão crítica do processo, dado que, observou-se pares inadequados para o controle. Ainda assim, os resultados foram satisfatórios para as demais malhas apresentando um índice de desempenho ITAE pequeno.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HEIDRICH, A. **Heurísticas para Projeto de Estruturas de Controle**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 144. 2004;

LIU, T.; GAO, F. **Industrial Process Identification and Control Design**. [S.l.]: Springer, 2012;

MORAIS, J. S. et al. **Controle Multivariável Aplicado à um Forno de Fusão**. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. Uberlândia-MG: [s.n.]. 2013. p. 6;

QUIRINO, P. P. D. S. **Estratégias de Controle Aplicadas a Reatores de Polimerização de Eteno em Solução**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2012;

SVRCEK, W. Y.; MAHONEY, D. P.; YOUNG, B. R. **A Real - Time Approach to Process Control**. 2º. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 2, 2006;

SVRCEK, W. Y.; MAHONEY, D. P.; YOUNG, B. R. **A Real -Time approach to Process Control**. 3º. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, v. 3, 2014.

