

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos  ISSN : 1984-7521	<b>Artigo: 30</b>
	<b>Páginas: 219 - 225</b>

## **Fronteiras em Controle de Processos**

Cid Marcos G. Andrade

Universidade Estadual de Maringá – UEM – PR, cidmga@yahoo.com.br

### **Resumo**

Um sistema de controle de processos envolve, normalmente, as seguintes etapas: o modelo do processo, o sistema de medida e o sistema de controle. Ao longo do tempo tivemos desenvolvimentos nestas etapas, seja de forma isolada ou em conjunto. Neste trabalho pretendemos pontuar, sem muita profundidade, o que entendemos como as pesquisas ou desenvolvimentos que têm sido feitos atualmente; evidentemente não pretendemos colocar todos os temas. Desta forma dividimos o trabalho nas etapas que envolvem o controle de processos e na sequência temas correlatos. Pode-se concluir que os métodos apresentados aqui têm contribuído para a melhora no controle de processos e como consequência processos mais eficientes.

### **1. Introdução**

Dispositivos automáticos, que presunõe a existência de algum tipo de controle, já existiam antes da era Cristã, como: relógios de água, portas automáticas, dispositivos à vapor de água, etc [1]. [2] faz um breve histórico sobre o desenvolvimento do controle de processos. Dando ênfase ao primeiro dispositivo, registrado que foi o regulador centrífugo construído por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII. Cita também os autores Minorsky, Hazen e Nyquist que a partir de 1920 desenvolveram importantes estudos na área, como: pilotagem de embarcações, servomecanismos e estabilidade dos sistemas de controle. A partir de 1940, com procedimentos no espaço da frequência, autores como Bode, Zielgler-Nichols desenvolveram métodos de sintonia e a própria teoria de controladores PID; a seguir Evans propõe o método de sintonia chamado Lugar de Raízes. A partir de 1960 temos o desenvolvimento no domínio do tempo, do chamado Espaço de Estados, que entre outras coisas possibilitou se trabalhar com sistemas multivariáveis. Entre 1960 e 1980 temos o desenvolvimento da teoria de controle ótimo de sistemas determinísticos e estocásticos, bem como o controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos. Assim como os sistemas de controle baseados no modelo do processo, os controles preditivos. Mais recentemente temos formalizada a teoria de controle robusto [3] e a interação do projeto do sistema de controle com o projeto do processo [4], que será tratado brevemente aqui.

A seguir apresentamos o que entendemos por serem as fronteiras do conhecimento em Controle de Processos. Evidentemente que muitas coisas ainda estão em pleno desenvolvimento, por exemplo a sintonia de controladores PID permanece em constante desenvolvimento, como pode-se ver em [5].

<p><b>14 e 15 de março de 2019</b> <b>Curitiba - Paraná</b></p>
---

## **2. Modelagem**

A modelagem de processos pode ser feita de duas formas: a fenomenológica, via balanços e equações constitutivas (sejam de propriedades ou de coeficientes de transferência) e a via dados entrada e saída (chamada caixa preta, ou identificação). Podemos definir uma terceira, a mista (também chamada caixa-cinza, ou identificação de parâmetros) isto é, usa conceitos fenomenológicos para a estrutura do equacionamento do modelo e dados do processo para ajustar parâmetros que são desconhecidos a priori [6].

### ***2.1 Modelos fenomenológicos***

Os processos mais complexos, como os bioquímicos, têm sido modelados por um método relativamente recente (1990), apesar de que os conceitos já eram conhecidos, o das rotas metabólicas, como pode-se ver em [7]. E, aplicado em [8]. Este tipo de modelagem possibilita a introdução de etapas intermediárias de produção, ao contrário do convencional (Produto, Substrato e Microorganismo), o que possibilita manipular as condições operacionais e tentar otimizar a produção.

Outra metodologia de modelagem (e, eventualmente o controle em malha aberta) para os casos em que temos crescimento de populações, como é o caso dos processos bioquímicos e similares têm-se investigado o uso da Lógica de Fuzzi (ou Lógica Nebulosa). Trata-se de uma teoria desenvolvida por Zadeh em 1965, que pode ser entendido como uma situação em que não é possível responder "sim" ou "não". Mesmo tendo informações suficientes e necessárias para o caso, seria alguma coisa entre "sim" e "não", como "talvez" ou "quase", são mais convenientes [9] em [10] temos uma aplicação prática. Em [11] temos uma aplicação para um processo biotecnológico.

### ***2.2 Modelagem Caixa-Preta (Identificação de Processos)***

[6] faz uma revisão dos métodos matemáticos de identificação em malha aberta e malha fechada. Lá, e naquele período, os processos de identificação sejam em malha aberta ou fechada eram feitos, basicamente, usando métodos determinísticos. E, as equações (principalmente quando em malha fechada, devido às características intrínsecas à situação) eram contempladas por equações lineares. Para outras situações já se usava a identificação por Redes Neurais, quando os processos apresentavam grandes não linearidades como apresentado em [12], aí também os métodos matemáticos de ajuste eram determinísticos. Atualmente tem-se usado métodos heurísticos para a obtenção dos parâmetros, seja o processo de identificação linear ou/e principalmente quando não linear. Os métodos normalmente abordados são: PSO (Otimização por Enxame de Partículas), AG (Algoritmos Genéticos), DE (Evolução Diferencial) e outros [13].

Em muitas situações temos a possibilidade de fazer a redução de um modelo obtido via o cálculo convencional para um modelo que usa cálculo fracionário [14].

### ***2.3 Identificação Mista (Caixa Cinza, ou Identificação de Parâmetros)***

Neste caso, as teorias empregadas nos casos anteriores são estendidas para esta situação.

Uma junção das teorias acima aparece, por exemplo em [15] onde os autores usam um processo difusivo anômalo (portanto, necessitando de cálculo fracionário) para a estimativa dos parâmetros difusivos usando algoritmos heurísticos.

### **3. Sensores**

Para que se possa atuar sobre um processo é preciso conhecer, dinamicamente, como variam as grandezas. Os processos de medidas de grandezas físicas, químicas ou biológicas são feitos por sensores. Um sensor é frequentemente definido como um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo. Os sensores capazes de atuar em processos podem ser: “in line”, na linha de produção que não obrigatoriamente esteja no local, podendo ter um retardo por transporte (“delay”, tempo morto); “in situ” no local, neste caso a grandeza é medida sem atraso por transporte (sem “delay, sem tempo morto); “on line” em tempo real, isto é disponível no tempo de processamento. As características necessárias são que sejam “on line” e “in line”. “In situ” não é obrigatório, podendo-se calcular o atraso por transporte.

Nem sempre temos sensores com estas características. Desta forma tem-se tentado desenvolver sensores com estas características, como em [17] que desenvolveu um sensor de umidade que pode trabalhar, “on line”, “in line” e algumas vezes “in situ”. Outro trabalho desenvolveu-se um turbidímetro para medidas “on line”, podendo ser usado, com adaptações para “in line” e “in situ”, como em [18].

Tem-se buscado também a possibilidade de acompanhar os processos por meio de imagens digitais, como em [19] para processos biotecnológicos, ou em processamento de laranjas [20]. Ainda sensores de vazão, como em [21].

Deve se levar em consideração a possibilidade do sistema de sensores estar em rede, como em [22] e estando em rede, esta deve ser ótima sob algum critério, como em [23].

### **4. Controladores**

Os controladores PID são os mais usados nas indústrias, foram sintonizados, primeiramente, no domínio da frequência e depois, também no domínio do tempo. É uma assunto, ainda que tem apresentado sempre inovações [32] e [5].

O processo de sintonia de controladores deve ser visto como um processo de otimização, isto é quais são os melhores parâmetros para o PID que apresentem melhor performance para o sistema de controle. Como lidamos cada vez mais com processos mais complexos, os métodos clássicos por vezes não são suficiente mente precisos. Desta forma, com o intuito de aperfeiçoar essa busca e conseguir um controle mais eficiente, algoritmos heurísticos como o de Evolução Diferencial (ED), Algoritmo Genético (AG) e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (Particle Swarm Optimization –PSO), são uma alternativa [33].

Algumas vezes os processos são muito complexos e precisam que os controladores sejam PID fracionários. O cálculo fracionário representa hoje uma nova alternativa, ainda mais precisa, para descrever processos e fenômenos. Apesar de ser um tema relativamente novo no campo industrial e da pesquisa, o cálculo fracionário é uma ferramenta matemática antiga, tendo nascido concomitantemente ao cálculo convencional [34]. Em [35] temos uma revisão sobre isto.

PID fracionários sintonizados podem ser melhor sintonizados quando usamos métodos heurísticos, como em [39].

## **5. Integração do Projeto do Processo com o Projeto do Controlador**

Normalmente, o projeto global de um processo baseia-se exclusivamente em objetivos econômicos e informações de estado estacionário do processo. Após a concepção do processo, é feito o projeto do sistema de controle que visa manter o processo dentro das especificações do projeto a despeito de perturbações (tanto na carga e na referência) e incertezas no próprio projeto.

A partir dos anos 80, o acoplamento ou interação do projeto do processo com o projeto dos sistemas de controle passou a ser foco de desenvolvimento e pesquisa. Este interesse resulta da constatação de que nem sempre o melhor projeto do processo apresenta o melhor desempenho dinâmico, com implicações na controlabilidade (do ponto de vista operacional, um tanto diferente da controlabilidade matemática de Kalman) da planta. Este problema pode ser reduzido em uma abordagem simultânea dos objetivos econômicos e dos de controlabilidade do regime transiente nos estágios iniciais da concepção do projeto. Resultam desta interação, melhores rendimentos e menor consumo de utilidades. Esta superioridade, do ponto de vista dinâmico, pode reduzir a produção de produtos fora de especificação, diminuir emissões de poluentes, melhorando os impactos ambientais.

A necessidade de minimizar o investimento fixo e o consumo de utilidades, atendidas as restrições de qualidade dos produtos gerados, promovem projetos de processos integrados em termos energéticos (reciclo de energia) e de massa (reciclo de massa). Estas integrações são normalmente concebidas sem considerações de controlabilidade e flexibilidade destes projetos, criando dificuldades no controle dos processos, uma vez que, além de reduzir aos graus de liberdade do processo, alteram de forma indesejada o desempenho dinâmico do processo: as constantes de tempo, realimentações internas, etc. Os projetos resultantes são mais eficientes (mais próximos da reversibilidade, do ponto de vista termodinâmico), reduzindo os gradientes (de concentração e temperatura). Nesta situação, isto é, havendo pequenos gradientes, reduz-se a força motriz para reconduzir o processo ao ponto desejado, na ocorrência de perturbações de carga ou nos valores de referência das variáveis controladas.

Assim, uma análise termodinâmica, sob o ponto de vista dissipativo, pode nos levar a um ponto ótimo, ou próximo disto, isto é o quanto podemos integrar o processo de forma que não comprometa a sua controlabilidade.

Assim, propomos, aqui, uma abordagem termodinâmica fundamentada nos conceitos apresentados em [24], relacionando exergia e controlabilidade. Bem como a conexão entre a termodinâmica (reversibilidade) e o controle (efeitos dissipativos) apresentados em [25, 26, 27 e 28]. Tentado, com estas ferramentas encontrar um ponto

de ótimo entre a integração e a controlabilidade/flexibilidade. Os trabalhos de [29 e 30] são as bases teóricas desta abordagem.

A possibilidade de se fazer o projeto integrado, colocando o “custo/ganho” que o sistema de controle nos dá, e o “custo/ganho” de energia quanto mais se integra energeticamente as plantas, [31].

## **6. Softwares para a Simulação de Sistemas de Controle**

Só há pouco tempo, a partir dos anos 2000, os simuladores puderam trabalhar dinamicamente, como o Hysys (36), o VMGSim (37). Portanto, somente agora é possível simular os processos nas mais diferentes configurações do ponto de vista de eficiência energética com os mais diferentes sistemas de controle. Podemos citar outros softwares para este fim como o EMSO, ASCEND, DAETOOLS, entre outros[38].

Outro fator como fronteira está em se considerar o sistema distribuído com seus laços de controle individuais, com o conceito de “plantwide control” ou o sistema todo como multivariável [24].

## **7. Conclusões**

Apresentamos aqui o que entendemos por ser as fronteiras de investigação na área de controle de processos. Pode-se ver que temos muitos assuntos ainda abertos, mesmo os supostamente já estabelecidos e outros que são mais recentes.

## **8. Referências**

1. <https://seuhistory.com/programas/episodios/tecnologia-grega-antiga>
2. Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno, 5 ed. Pearson, São Paulo, 2010.
3. Zhou, K., Doyle J. C., & Glover, K. Robust and Optimal Control, Prentice-Hall, Upper, Saddle River, NJ. 1995.
4. Narraway, L.T.; Perkins, J. D.; Barton, G. W. Interaction between process design and process control: Economic analysis of process dynamics. Journal of Process Control, Vol.1(5), pp. 243-250, 1991
5. Advances in PID Control. Edited by Valery D. Yurkevich. Published by InTech. Rijeka, Croatia. 2011
6. Andrade, C. M. G. Identificação de Processos Químicos em Malha Fechada. Tese Doutorado. FEQ/UNICAMP, 2000.
7. Stephanopoulos, G.; Aristidou, A.; Nielsen, J. Metabolic Engineering. Academic Press, USA, 1998.
8. Giovanni, M. Y. G. ; Acorsi, R. L. ; Olivo, J. E.; ; Andrade, C. M. G. Modelagem do Processo de Produção de Bioetanol em Dynetica utilizando rotas Metabólicas: Anais do III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos, v. 1. p. 244-249. 2018
9. Rignel, D. G. S.; Chenci, G. P.; Lucas, C. A. Uma introdução a Lógica de Fuzzi. RESIGeT, v. 1, n. 1, 2011.
10. Martins, M. ; Bassanezi, R. ; Andrade, C. M. G. . Sistemas P-Fuzzi Aplicados à Dinâmica Pòpulacional. In: Anais do III Simpósio Paranaense de Modelagem,

Simulação e Controle de Processos. v. 1. p. 1-8. 2018

11. Nucci, E. R.; et al. A Fuzzi Logic Algorithm for Identification of the Harvesting Threshold during PGA Production by *Bacillus megaterium*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 22, No. 04, pp. 521 - 527, October - December, 2005.
12. Chen, S.; Billings, S. A. Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification. International Journal of Control, v. 56, Issue: 2, pp. 319-346, 1992.
13. Demiti, F. P.; Andrade, C. M. G. Estado da Arte em Métodos Numéricos para Algoritmos Meta-heurísticos. SIMPROIN, Paranavaí, 2018.
14. Tepljakov, A. Fractional-order Calculus based Identification and Control of Linear Dynamic Systems. Master thesis. Tallinn University of Technology. 2011.
15. Khan, N. A. et al. A heuristic optimization method of fractional convection reaction: An application to diffusion process. Thermal Science. v. 22, 2018.
16. Fraden, J. Handbook of Modern Sensors. Physics, Design and Applications. 3. Ed. Springer, California, 2004.
17. Alcantara, G. P. et al. Humidity sensor based on zeolite for application under environmental conditions. Microporous and Mesoporous Materials (Print), v. 247, p. 38-45, 2017.
18. Sperandio, L. C. C. Desenvolvimento de Turbidímetro Portátil de Baixo Custo para Processos. Dissertação de Mestrado. DEQ/UEM. 2018.
19. Certório, J.; et. al. Monitoring of Fermentative Processes via Image Processing Online and in Situ. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, v. 1, p. 417-421, 2018.
20. Fermo, I.; Andrade, C. M. G. Image Processing on Orange Industry, a Brief Review. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, v. 1, p. 435-439, 2018.
21. Rodrigues, E. J. et al. Desenvolvimento de um hidrômetro digital utilizando o KIT TDC1000- TDC7200EVM da Texas Instruments. SIMPROIN, Paranavaí, 2018.
22. Tonon, T.; et. al. Instrumentação em Coluna de destilação para fim de Controle. In: Anais do III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos. Curitiba, 2018a. v. 1. p. 62-68. 2018.
23. Tonon, T.; et. al. Estudo de otimização de rede de sensores. SIMPROIN, Paranavaí, 2018.
24. Luyben, W. L. et al. Plantwide process control. McGraw-Hill, New York. 1998.
25. Ydstie, B. E. e K. P. Viswanath. From thermodynamics to a macroscopic theory for Process control. In: AIChE Meeting. 1994.
26. Ydstie, B. E. e A. A. Alonso. Process systems and passivity via the Clausius-Plank Inequality. Systems & Control Letters, 30, 253-264. 1997.
27. Ydstie, B.E. Process control: the passive systems approach review of, by Bao, J., Lee, P.L. IEEE Contr. Syst. Mag. (Feb.), 78-80. 2010.
28. De León, C.; et al. Thermodynamically-based response time as controllability indicator in heat exchanger networks. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 95, p. 1305-1312, 2016.
29. Montelongo-Luna, J. M. The Relative Exergy Array- A New Measure for Interactions in Process Design and Control. The Canadian Journal of Chemical

- Engineering. 545-549. 2011
30. Munir, M. T. et al. The Relative Exergy-Destroyed Array: A New Tool for Control Structure Design. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1686-1694. 2013.
  31. Sharifzadeh, M. Integration of process design and control: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 2515-2549. 2013.
  32. Åstrom, K.; Hagglund, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, USA. 1995.
  33. Demiti, F. T. & Andrade, C. M. G. Sintonia de controladores PID: estado da arte. SIMPROIN, Paranavaí, 2018.
  34. D. Cafagna. Fractional calculus: A mathematical toll from the pasto for presente engineers. *IEEE Ind Electron Mag*. 2(1), 35-40. 2007.
  35. Martins, G. M. et. al. Revisão sobre Controladores PID de ordem Fracionária. In: *Anais do III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos*. v. 1. p. 1-8. 2018
  36. <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspens-hysys>
  37. <https://virtualmaterials.com/VMGSim>
  38. Freitas, H. F. S. et al. Desenvolvimento de uma Ferramenta Orientada a equações de Código Aberto na Modelagem e Simulação de Processos. SIMPROIN, Paranavaí, 2018.
  39. Chakraborty, M. et. al. The Application of Stochastic Optimization Algorithms to the Design of a Fractional-order PID Controller. 10 Colloquium and the Third ICIIS, Kharagpur, INDIA. 2008.