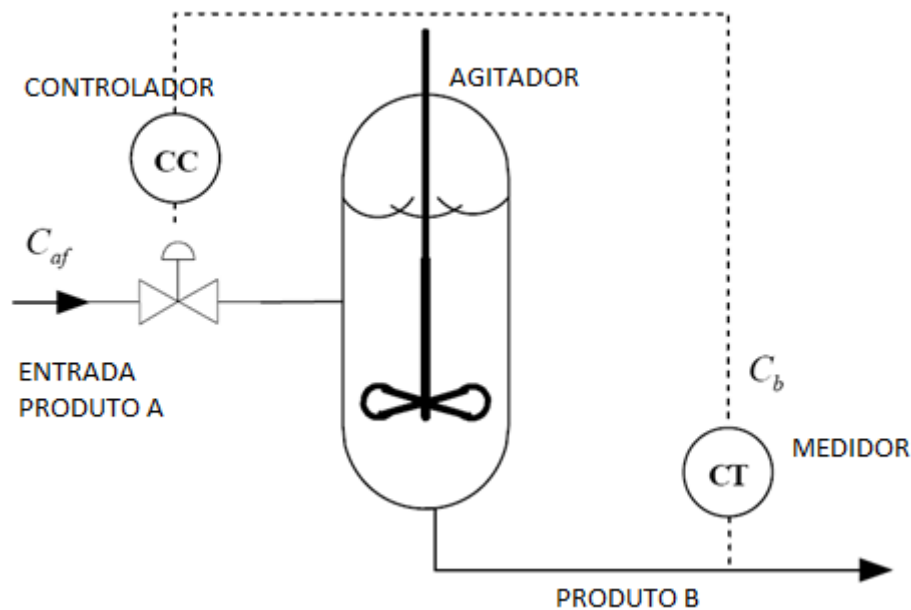
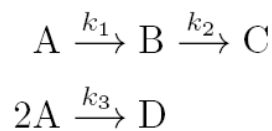


# Trabalho: Sistema de controle de um reator químico

A figura mostra um sistema de controle de concentração de produto em um reator continuamente agitado, usado na indústria química.



Neste caso se produz cyclopentenol (produto B) a partir de cyclopentadiene (produto A) pela adição de um catalizador diluído em água. O sistema ainda produz dois produtos residuais dicyclopentadiene (produto D) e cyclopentanediol (produto C). A reação vem dada por:



A dinâmica de produção de B neste caso pode ser representada por:

$$\begin{cases} \frac{dC_a(t)}{dt} = -k_1 C_a(t) - k_3 C_a(t)^2 + (C_{af}(t) - C_a(t)) \frac{F(t)}{V} \\ \frac{dC_b(t)}{dt} = k_1 C_a(t) - k_2 C_b(t) - C_b(t) \frac{F(t)}{V} \end{cases}$$

Os parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  se consideram constantes quando o reator trabalha a temperatura constante ( $k_1 = 6.01$  [1/min],  $k_2 = 0.8433$  [1/min],  $k_3 = 0.1123$  [mol/(l min)]).

A concentração que se quer controlar  $C_b$  [mol/l] (do produto B), depende de  $C_a$  e  $C_{af}$ , que são as concentrações de A [mol/l] no reator e no fluido de alimentação, respectivamente, e também da vazão  $F$  [l/min] da diluição.  $V$  é o volume [l] do reator, que é constante.

O sistema usa  $u = F/V$  como variável manipulada e  $C_{af}$ , a concentração da entrada é a principal perturbação.  $u$  pode variar entre 0 e 10 l/min, e a concentração de entrada  $C_{af}$  entre 4.0 e 6 mol/l.

## PARTE 1 – ANÁLISE DO SISTEMA E PROJETO POR ALOCAÇÃO

- 1) Analise o funcionamento do sistema em equilíbrio desenhando as características estáticas dentro da faixa de variação das diferentes variáveis envolvidas.
- 2) Usando Simulink, estude por simulação o comportamento dinâmico do sistema e verifique os pontos de equilíbrio encontrados no modelo estático. Para o ponto de equilíbrio dado por  $C_{Af} = 5.1 \text{ mol/l}$  e  $u = 1 \text{ [1/min]}$  determine a concentração de funcionamento em equilíbrio do produto A ( $C_a$ ) e do produto B ( $C_b$ ).
- 3) Para o ponto achado linearize o sistema encontrando um modelo incremental dinâmico. Desenhe um diagrama de blocos do sistema não linear e do sistema linearizado. Aplique transformada de Laplace no sistema linearizado e desenhe o diagrama de blocos em domínio “s”.
- 4) Para o sistema linearizado, usando operações com blocos encontre as funções de transferência que relacionam as variáveis manipulada e perturbação com as duas concentrações.
- 5) Usando simulink, estude por simulação o comportamento deste sistema e compare o comportamento com o do sistema não linear nas proximidades do ponto de equilíbrio. Repita a análise usando matlab (código .m). Para a simulação em matlab do processo aproxime a derivadas por  $dx/dt = (1/T_c) * (x(k+1) - x(k))$ , sendo  $T_c$  o tempo de cálculo da aproximação.
- 6) Realizando experimentos com o modelo não linear nas proximidades do ponto do equilíbrio obtenha um modelo simples de 1 ordem para as relações entre a variável manipulada e a concentração de B e a perturbação e a concentração de B. Projete um controle PI contínuo usando a técnica de alocação de polos para obter em malha fechada um sistema com  $t_{5\%}$  da ordem de 1.5 a 1.7 minutos e pico menor que 5%. Essa especificação deve ser atendida para resposta a seguimentos de degraus de referência de  $C_B$  e perturbações de  $C_{Af}$ . Use filtro de referência se necessário. Estude o comportamento do sistema sobre o modelo linearizado.
- 7) Analise as respostas em MF do sistema para degraus de referência e perturbação por simulação e interprete os resultados usando diagramas polo-zero e de resposta em frequência. Observe e quantifique as propriedades estáticas e dinâmicas das respostas. Poderia obter respostas mais rápidas? Como?
- 8) Usando *Simulink*, estude por simulação o comportamento dinâmico do sistema em MF com o modelo completo não linear e verifique se atende as especificações. Implemente um cenário de simulação com a partida do sistema em rampa até chegar no ponto de operação. Simule, então, variações perto do ponto de operação e aplique perturbações. Poderia obter respostas mais rápidas? Porque? Que acontece com o sistema ao se afastar do ponto de operação?
- 9) Discretize o controle do ponto 1, escolhendo adequadamente  $T_s$ . Implemente o controle em matlab, escrevendo o código de controle. Simule um cenário onde o sistema é levado até o ponto de operação em modo MANUAL e somente então o controle passa a AUTOMATICO. Usando

ferramentas no domínio da frequência analise o seu controle discretizado e compare com o contínuo. Analise o efeito da amostragem.

**IMPORTANTE: Realize todas as análises manualmente, sem ajuda do MATLAB, apenas use o software para conferir resultados.**

**O TRABALHO DEVE SER APRESENTADO ORALMENTE PELO GRUPO, PODENDO SER NUM ÚNICO DIA OU EM PARTES, A MEDIDA QUE VAI SENDO REALIZADO O TRABALHO. AS NOTAS SERÃO INDIVIDUAIS DE ACORDO COM ESTAS APRESENTAÇÕES E OS RESULTADOS OBTIDOS.**

**APRESENTE UM RELATÓRIO ESCRITO DO TRABALHO PARA ENTREGA COM UM RELATO DOS RESULTADOS.**

**ESTAS OBSERVAÇÕES AINDA SÃO VÁLIDAS PARA AS OUTRAS PARTES DO TRABALHO.**

## PARTE 2 – ANÁLISE E PROJETO POR LR

Na parte 1 se analisou o modelo e o sistema de controle de concentração de produto em um reator continuamente agitado, usado na indústria química. O controle usado foi um PI básico de  $C_B$  ajustado por alocação de polos.

A dinâmica de produção de A e B foi modelada nas vizinhanças de um ponto de operação dado por  $C_{AF} = 5.1 \text{ mol/l}$  e  $u = 0.8 \text{ [1/min]}$ . O reator tem parâmetros:  **$k_1 = 6.01 \text{ [1/min]}$ ,  $k_2 = 0.8433 \text{ [1/min]}$ ,  $k_3 = 0.1123 \text{ [mol/(l min)]}$** . Lembrando que o sistema usa  $u = F/V$  como variável manipulada e  $C_{AF}$  (concentração da entrada) é a perturbação.  $u$  pode variar entre 0 e 10 l/min, e a concentração de entrada  $C_{AF}$  entre 4.0 e 6 mol/l.

O modelo para ser usado no projeto do controle é então o obtido pela linearização analítica do modelo não linear nesse ponto de operação. Observe que esse novo modelo considera também a dinâmica de  $C_A$ . Assim, neste caso pode se escrever:

$$(s+1.6433) C_b(s) = 6.01 C_a(s) - 2.1699 U(s)$$

$$(s+6.9433) C_a(s) = 0.8 C_{af}(s) + 4.5067 U(s)$$

Recomenda-se desenhar um diagrama de blocos deste modelo para ver a relação entre variáveis.

### PEDE-SE:

- 1) Nesta parte, supõe-se que somente a medida de  $C_B$  pode ser usada na malha de controle.
  - a) Projete um controle contínuo usando a técnica de lugar de raízes para obter em malha fechada um sistema com  $t_5\%$  da ordem de 1.5 minutos e pico menor que 5%. Essa especificação deve ser atendida para resposta a seguimentos de degraus de referência de  $C_B$  e perturbações de  $C_{AF}$ . Use filtro de referência se necessário. O sistema deve ter ganho estático unitário para a relação referência-saída de  $C_B$ .
  - b) Estude o comportamento do sistema sobre o modelo linearizado por simulação. Realize análise dos diagramas polo-zero e da resposta em frequência do sistema e interprete os resultados. Observe o sinal de controle nos ensaios realizados. Compare este controle com o PI projetado na parte 1. Discuta.
- 2) Usando *Simulink*, estude por simulação o comportamento dinâmico do sistema em MF com o modelo completo não linear e verifique se atende as especificações. Implemente um cenário de simulação com a partida do sistema em rampa até chegar no ponto de operação. Simule, então, variações perto do ponto de operação e aplique perturbações. Que acontece com o sistema ao se afastar do ponto de operação? Compare este controle com o PI projetado e discuta.

- 3) Considere agora que dispõe de mais um sensor de concentração que pode ser usado para medir  $C_{AF}$  ou  $C_A$ .
- a) Proponha dois sistemas de controle, um com cada uma das medições disponíveis, de forma a melhorar o desempenho obtido no item 2. Ajuste estes dois novos sistemas de controle, compare e decida qual é mais interessante. Pode realizar os projetos no plano  $s$ . Usando ainda o processo modelado de forma linear simule, analise diagramas polo-zero e interprete os resultados.
  - b) Implemente em matlab (no tempo discreto) a solução escolhida definindo adequadamente  $T_s$  supondo um sustentador de ordem zero no sistema AD/DA.
- 4) Simule agora o sistema não linear controlado em MF com a sua proposta de controle. Utilize um cenário onde o sistema é levado até o ponto de operação em modo automático com uma rampa de aproximação (defina uma rampa de referência adequada). Aplique perturbações e simule ruídos de medição para obter um cenário próximo da realidade. Analise os sinais, compare os resultados com os da parte 1 e discuta.

## PARTE 3 - Sistema de controle de um reator químico com atraso de medição de concentração

Na parte 2 se estudou o controle completo da concentração de produto em um reator continuamente agitado, usado na indústria química. Para este sistema foi estudada uma estrutura com uma malha interna e uma externa, assim como com ação feed forward.

Para esta tarefa temos que estudar o mesmo problema da parte 2 (usando o mesmo ponto de equilíbrio e o mesmo modelo) mas considerando que na medida de concentração de saída B tem um atraso de 3 minutos causado pelo deslocamento do produto até o sensor e o tempo de processamento do sensor. Assim, neste caso, o sistema de controle da malha principal deveria ser reajustado. A malha interna de  $C_A$  ou o feedforward de  $C_{AF}$  não serão mais usadas aqui.

### PEDE-SE:

- 1) Projete um controle com base no Preditor de Smith (em tempo discreto) para obter em malha fechada um sistema com aproximadamente as mesmas características transitórias ( $t_{5\%}$  e pico) e permanentes (erro em regime permanente) que as obtidas na parte 2 (considere o  $t_{5\%}$  medido depois do atraso). Essa especificação deve ser atendida para resposta a seguimentos de degraus de referência de  $C_B$  e perturbações de  $C_{AF}$ . Use filtro de referência se necessário. Lembre-se que o sistema deve ter ganho estático unitário para a relação referência-saída de  $C_B$ . Estude o comportamento do sistema sobre o modelo linearizado por simulação. Conclua sobre as propriedades em MF do Preditor de Smith para este sistema. As especificações foram atendidas?
- 2) Usando *Simulink*, estude por simulação o comportamento dinâmico do sistema em MF com o modelo completo não linear e verifique se atende as especificações. Utilize o mesmo cenário da parte 2, com a partida do sistema em rampa até chegar no ponto de operação e variações perto do ponto de operação, inclusive com perturbações. Que acontece com o sistema ao se afastar do ponto de operação? Realize um estudo de robustez para justificar os resultados.
- 3) Considere agora que deseja melhorar a resposta do Preditor de Smith. Utilize então um Preditor de Smith filtrado para o controle de  $C_B$ . Que pode ser melhorado com este novo controle? Repita as simulações para o modelo linear e não linear. A performance é melhorada como previsto em ambos os casos? Discuta e justifique os resultados com uma análise de robustez do sistema. Encontre o controle equivalente e analise a ordem do mesmo e sua implementação por equações a diferença.