

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Química - COPPE
COQ 792 - Controle de Processos

Lista 3

Gustavo Luís Rodrigues Caldas

26 de dezembro de 2020

Questão 1

a

Para a destilação binária água-metanol, um aumento na vazão de vapor no revededor induz uma diminuição em ambas as frações de metanol no topo e no fundo. Isso é consistente, pois mais vapor na coluna induz a mais impurezas tanto na seção de esgotamento quanto de retificação. Essas mudanças são igualmente rápidas na coluna toda, por isso, os tempos mortos na segunda coluna da matriz são iguais (3 s), mas as mudanças na seção de esgotamento duram menos tempo, portanto, sua constante de tempo é menor.

Um aumento da vazão de refluxo, por outro lado, causa um aumento nas frações de metanol tanto no topo quanto no fundo (menos impurezas na coluna). Esse aumento é sentido muito mais rapidamente no topo do que no fundo, por isso o tempo morto é menor (1 s). Uma vez sentida, essa mudança é mais rápida na seção de esgotamento do que de retificação, portanto, a constante de tempo do primeiro é menor.

No Simulink, o sistema foi submetido ao degrau unitário em u_1 no tempo zero e depois outro degrau unitário em u_2 no tempo 50 s. Conforme a figura 1 mostra, inicialmente, y_1 e y_2 respondem em crescente de acordo com $G_{p_{11}}$ e $G_{p_{21}}$, respectivamente. Porém, o segundo degrau unitário induz decréscimo por $G_{p_{12}}$ e $G_{p_{22}}$. Isso demonstra como o ganho de uma malha pode mudar de sinal afeta quando a outra está fechada.

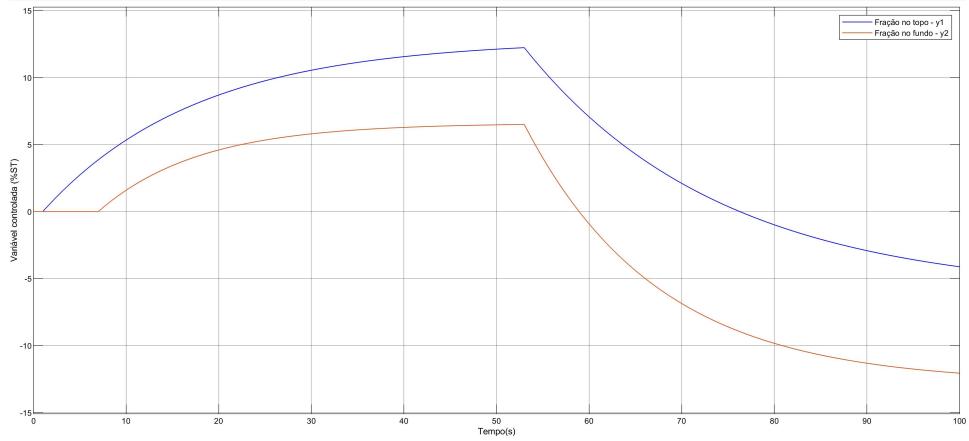


Figura 1: Resposta interativa ao degrau do problema coluna binária de destilação.

b

O diagrama de blocos do arquivo "Wood_Berry_MA.m" para malha aberta está demonstrado abaixo:

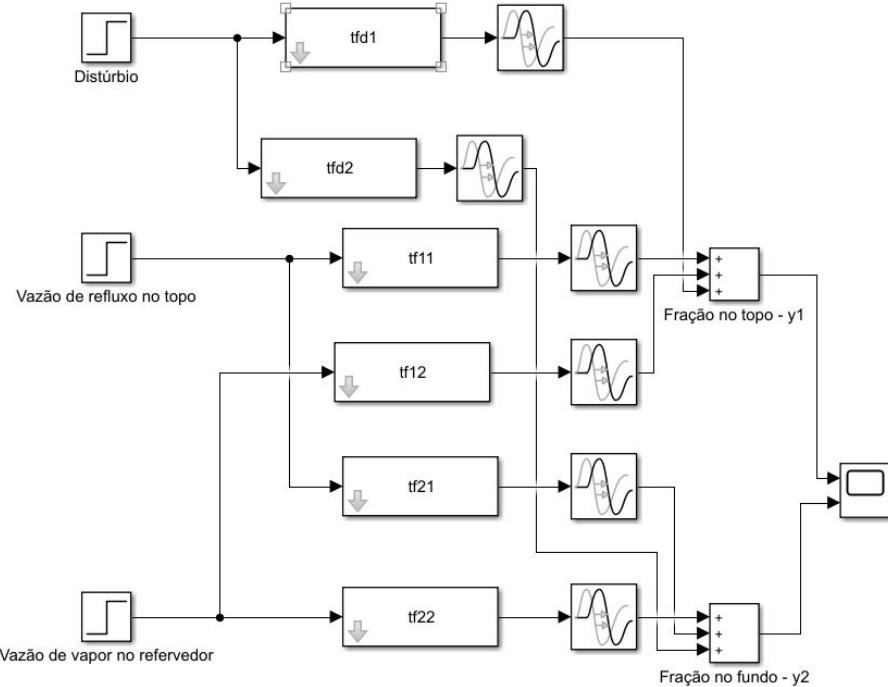


Figura 2: Diagrama de blocos de malha aberta no Simulink para o problema da coluna binária de destilação.

c

A matriz de ganhos relativos foi calculada e o resultado é:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 2.0094 & -1.0094 \\ -1.0094 & 2.0094 \end{pmatrix} \quad (1)$$

A indicação sugerida por Bristol sugere emparelhar u_1-y_1 e u_2-y_2 , pois caso contrário, seguir-se-ia uma caminho de interações negativas, sendo consistente com o apresentado no item anterior.

Lembrando que o método de Bristol baseia-se em uma metodologia estática, logo não considera a presença de tempos mortos. Neste caso, a metodologia de Bristol indica seguir a combinação de emparalhamento cuja funções de transferência têm menores tempos mortos, não sendo, portanto, um impedimento para sua implementação.

d

Foi introduzido um degrau unitário no ponto-fixo de y_1 e na carga contrariando as indicações de Bristol, isto é, u_2-y_1 (malha 1) e u_1-y_2 (malha 2). As sintonizações para um PI por Ziegler-Nichols são:

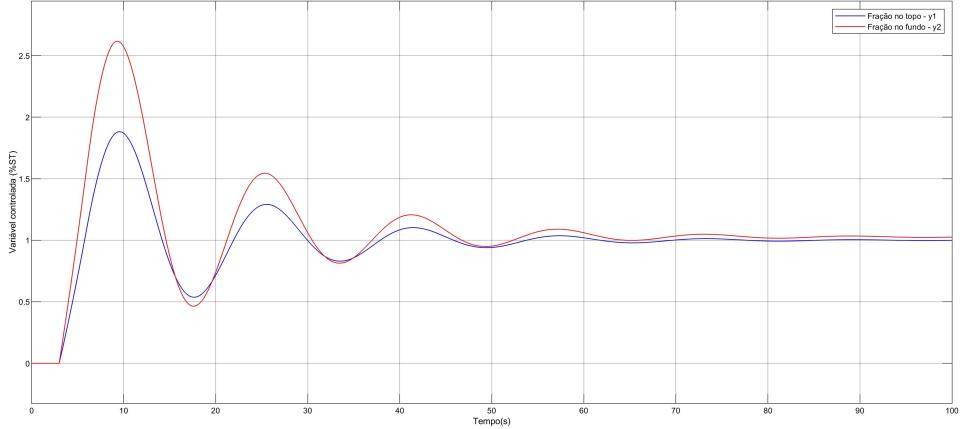
$$\text{Malha 1 : } K_c = -0.3608, \tau_I = 21.0 \text{ s} \quad (2a)$$

$$\text{Malha 2 : } K_c = 0.2834, \tau_I = 10.9 \text{ s} \quad (2b)$$

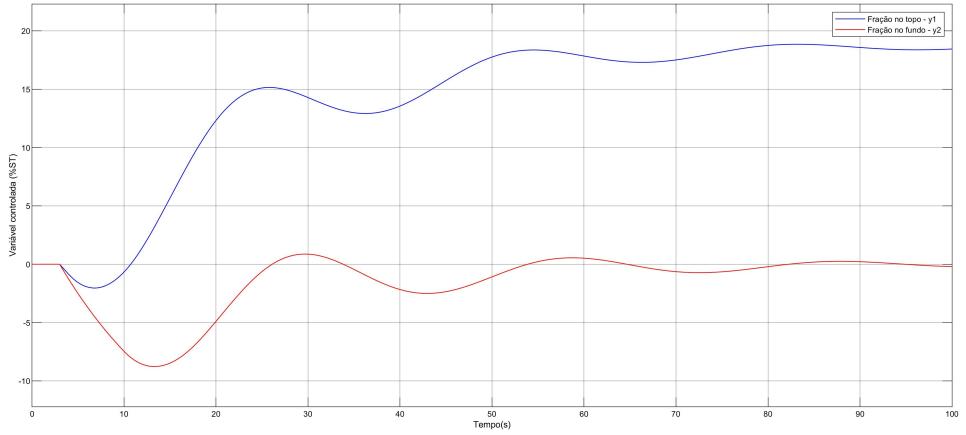
Para este caso, repare que a malha 1 consegue ajustar corretamente y_1 para o seu novo ponto-fixo. Entretanto, a malha 2 estando aberta, foge ao seu ponto-fixo devido à ação de u_2 , manipulando a saída de y_2 por conta das interações (resultado de $G_{p_{22}}$), sendo este último o efeito retaliatório nesse caso de emparelhamento.

Em um cenário contrário, ainda com degrau em y_1 (na verdade, na entrada em u_2), mas agora somente a malha 1 está aberta, sendo u_1 que manipula y_2 . A malha 2 consegue manter y_2 no seu set-point, que é zero. A malha 1, por sua vez, estando aberta, primeiro responde com um ganho negativo ($G_{p_{12}}$) e depois ocorre uma resposta em sinal oposto, devido às manipulações de u_1 ($G_{p_{11}}$). Aqui verificamos as interações negativas, pois o ganho final de y_1 é de sinal oposto se a malha 2 estivesse aberta também (variação original de y_1 como resposta à u_2).

Agora fechando ambas as malhas, verifica-se o efeito total dessa interação negativa: uma variação em y_1 induz uma resposta negativa, esta variação negativa, por sua vez, faz o controlador aumentar a sua saída (ação reversa). A resposta, ao invés de aumentar, faz o controlador aumentar ainda mais a saída. O efeito é propagado e a situação foge ao controle.

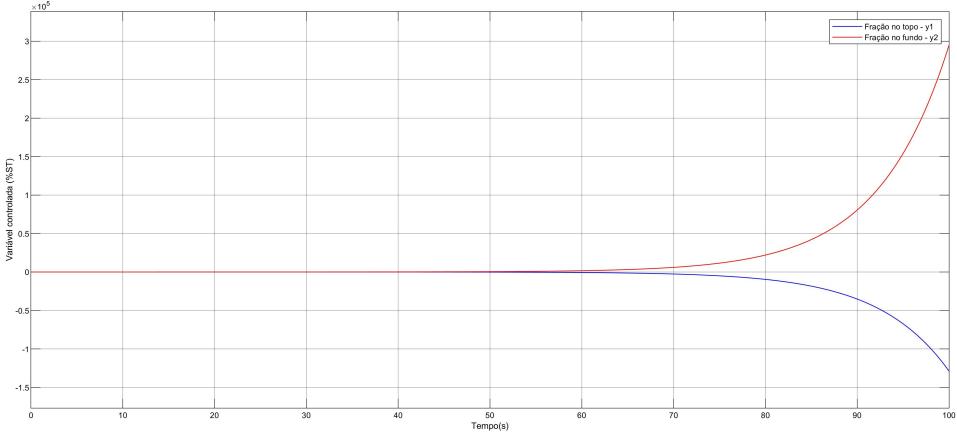


(a)

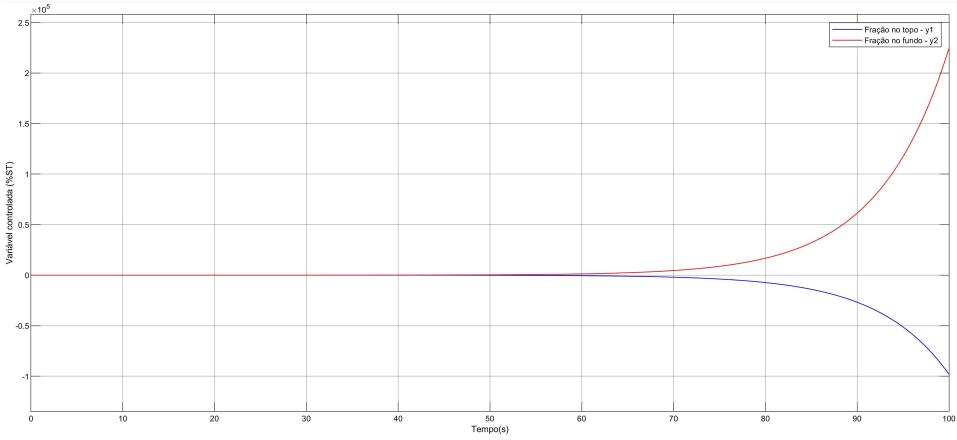


(b)

Figura 3: Simulação da resposta para degrau no ponto-fixo em y_1 no caso de variáveis emparelhadas contrárias a Bristol: (a) Malha 1 fechada, (b) Malha 2 fechada.



(a)



(b)

Figura 4: Simulação da resposta com as duas malhas fechadas no caso de variáveis emparelhadas contrárias a Bristol para: (a) degrau no ponto-fixo em y_1 , (b) degrau no distúrbio.

e

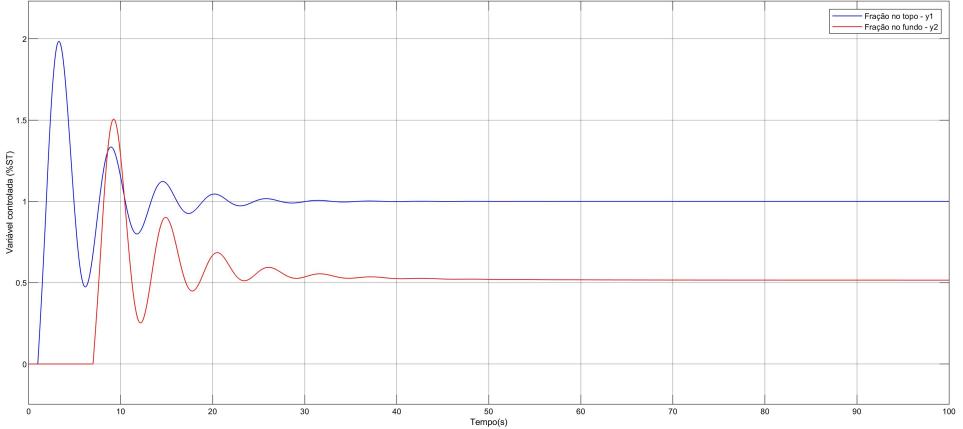
Foi introduzido um degrau unitário no ponto-fixo de y_1 e na carga obedecendo às indicações de Bristol, isto é, u_1-y_1 (malha 1) e u_2-y_2 (malha 2). As sintonizações para um PI por Ziegler-Nichols são:

$$\text{Malha 1 : } K_c = 1.2216, \tau_I = 2.5430 \text{ s} \quad (3a)$$

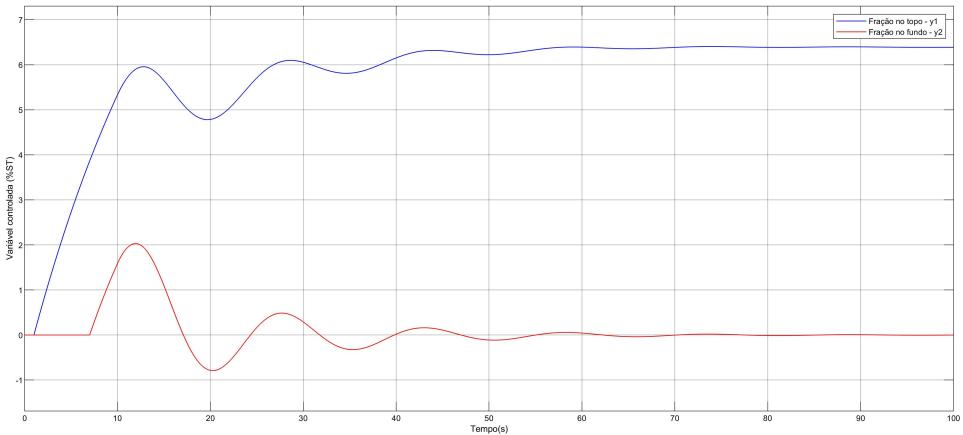
$$Malha 2 : K_c = -0.2484, \tau_I = 7.1449 \text{ s} \quad (3b)$$

A malha 1 consegue controlar adequadamente y_1 no seu *set-point*, após pouco mais de 20 s, a malha já está estável. Com a malha 2 estando aberta, y_2 é afetada devido às manipulações de u_1 , que por meio de $G_{p_{21}}$, levam a uma resposta na mesma variação original se todas as malhas estivessem abertas.

Ao abrir a malha 1 e fechar a malha 2, y_2 é controlada adequadamente e y_1 tem variações devido aos efeitos das manipulações de u_2 e $G_{p_{11}}$. Ao fechar as malhas, a resposta não ocorre de forma crescente e monotônica, mas de forma oscilatória. As oscilações crescentes, por sua via, se devem a um ajuste somente baseado em uma malha e ao efeito das interações positivas. Há necessidade de um ajuste mais conservativo.

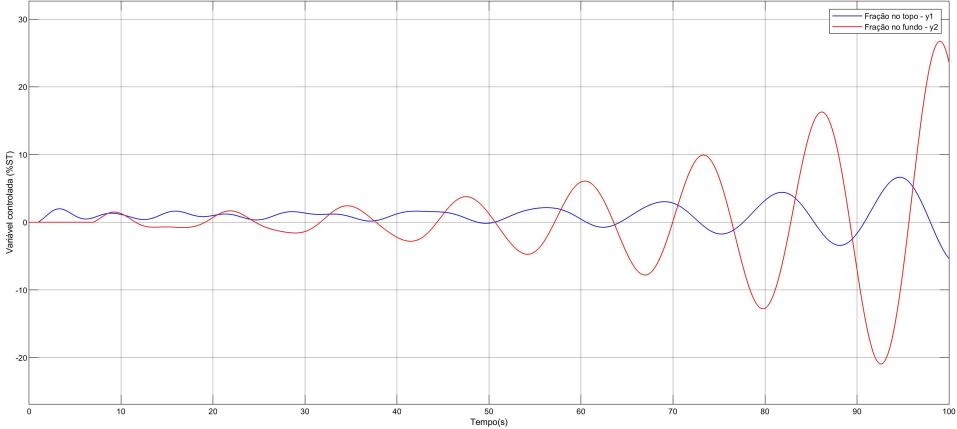


(a)

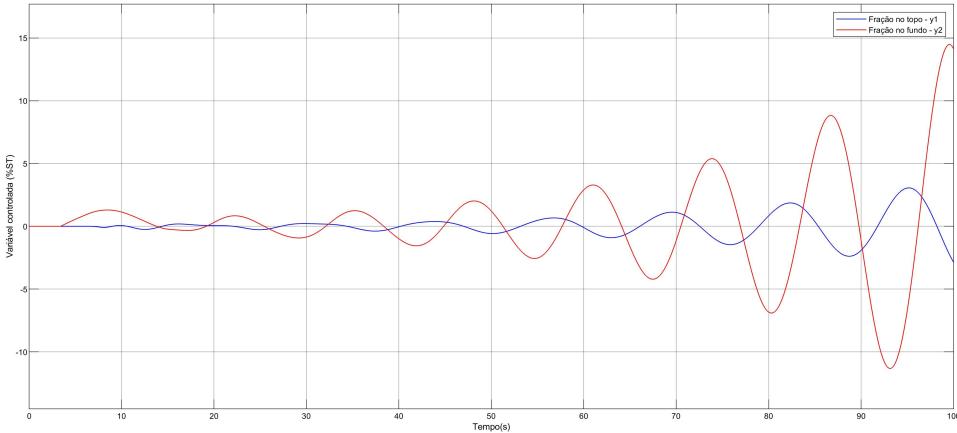


(b)

Figura 5: Simulação da resposta para degrau no ponto-fixo em y_1 no caso de variáveis emparelhadas favoráveis a Bristol: (a) Malha 1 fechada, (b) Malha 2 fechada.



(a)



(b)

Figura 6: Simulação da resposta com as duas malhas fechadas no caso de variáveis emparelhadas favoráveis a Bristol: (a) degrau no ponto-fixo em y_1 , (b) degrau no distúrbio.

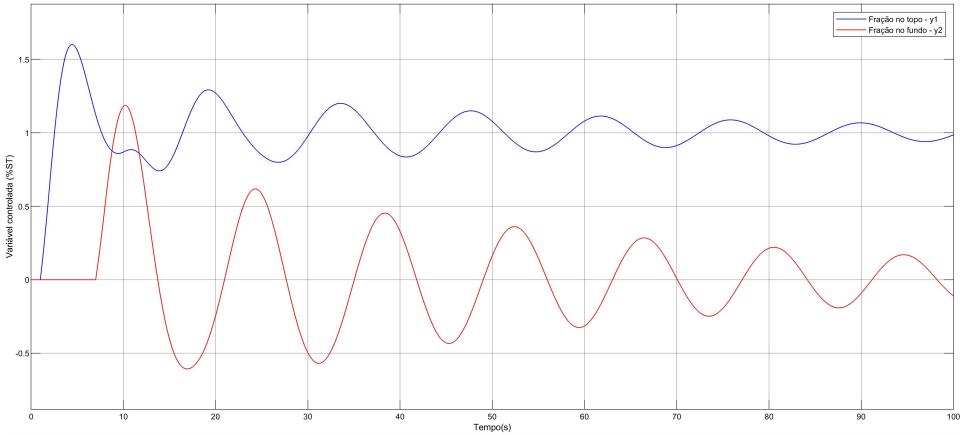
f

Foi introduzido um degrau unitário no ponto-fixo de y_1 , em y_2 e na carga obedecendo às indicações de Bristol, isto é, u_1-y_1 (malha 1) e u_2-y_2 (malha 2). As sintonizações para um PI por Ziegler-Nichols seguindo da resintonização de McAvoy são:

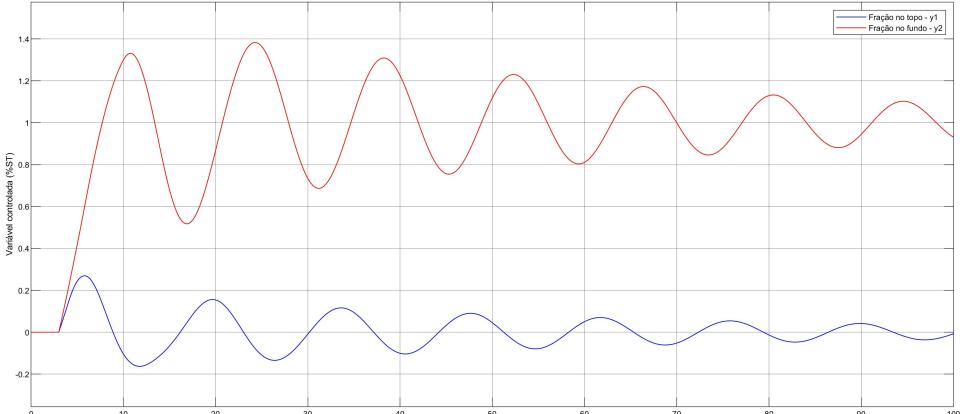
$$Malha 1 : K_c = 0.7149, \tau_I = 2.5430 \text{ s} \quad (4a)$$

$$Malha 2 : K_c = -0.1453, \tau_I = 7.1449 \text{ s} \quad (4b)$$

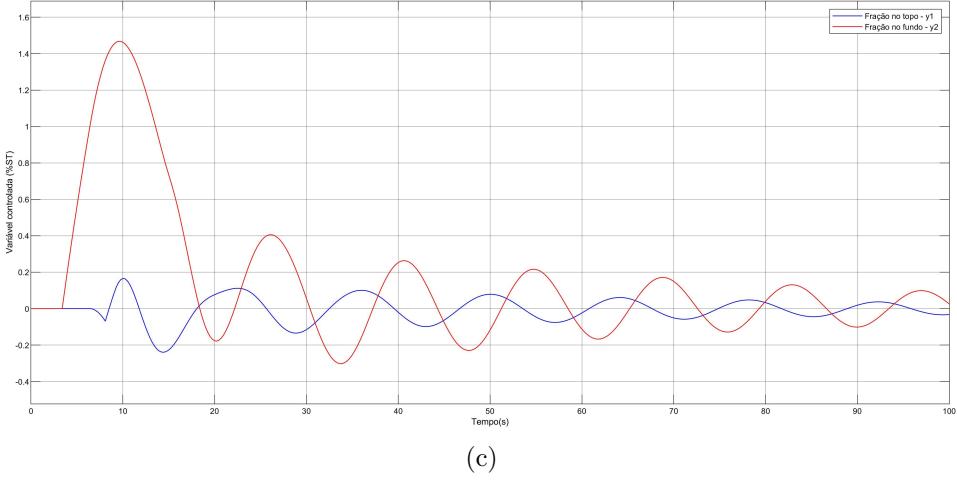
Verifica-se que o emparelhamento foi adequado e que o ajuste levou à respostas oscilatórias decrescentes (estáveis). Os efeitos retaliatórios ainda estão presentes, pois o degrau em um set-point afeta o set point do outro.



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Simulação da resposta com as duas malhas fechadas no caso de variáveis emparelhadas favoráveis a Bristol usando a estratégia de McAvoy: (a) degrau no ponto-fixo em y_1 , (b) degrau no ponto-fixo em y_2 , (c) degrau no distúrbio.

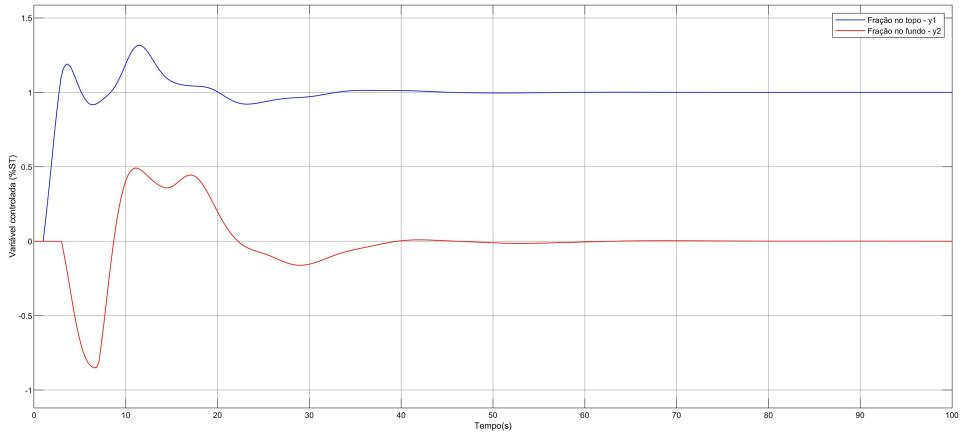
g

Foi introduzido um degrau unitário no ponto-fixo de y_1 , em y_2 e na carga usando desacopladores estacionários, isto é, $G_{l1} = -K_{12}/K_{11}$ e $G_{l2} = -K_{21}/K_{22}$. As sintonizações para um PI por Ziegler-Nichols:

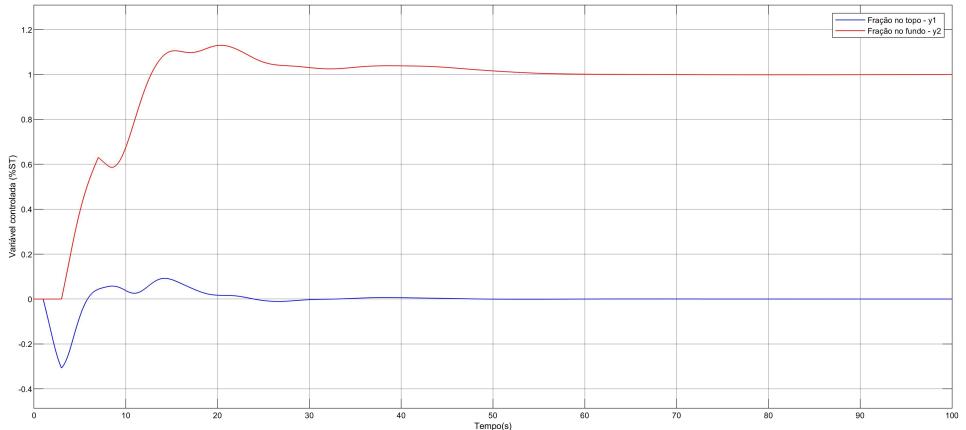
$$\text{Malha 1 : } K_c = 0.6758, \tau_I = 3.2863 \text{ s} \quad (5a)$$

$$\text{Malha 2 : } K_c = -0.1453, \tau_I = 7.1449 \text{ s} \quad (5b)$$

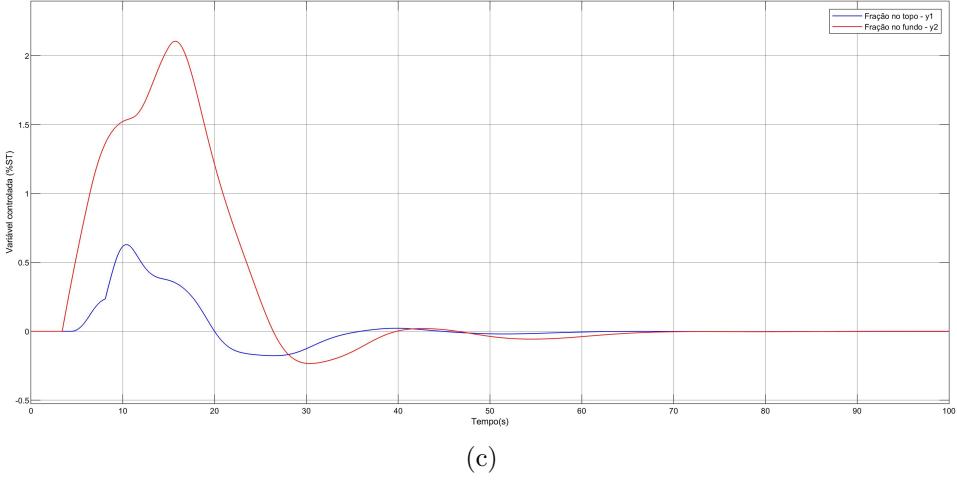
Para a malha 2 verificou-se que a sintonização de McAvoy seria melhor ser mantida. Repare que para este caso, o efeito de desacoplamento resume-se a um ganho, ou seja, o acoplamento é somente atingido no estado estacionário, isso significa que as malhas ainda sofrem interferências uma das outras, como visto nas figuras abaixo. Por outro lado, pode-se dizer que a estratégia de controle é bem-sucedida, pois estes acompanham os pontos-fixos.



(a)



(b)



(c)

Figura 8: Simulação da resposta com as duas malhas fechadas no caso de variáveis emparelhadas usando desacopladores estacionários: (a) degrau no ponto-fixo em y_1 , (b) degrau no ponto-fixo em y_2 , (c) degrau no distúrbio.

h

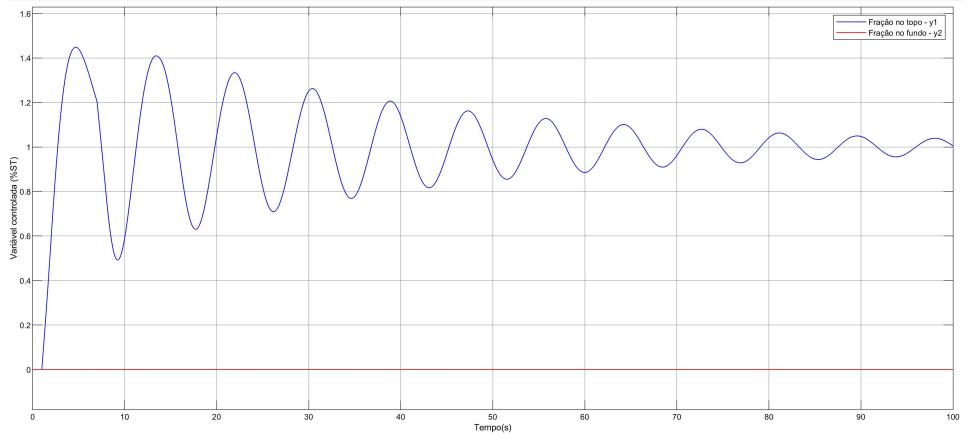
Foi introduzido um degrau unitário no ponto-fixo de y_1 , em y_2 e na carga usando desacopladores simplificados, isto é, $G_{l1} = -G_{p_{12}}/G_{p_{11}}$ e $G_{l2} = -G_{p_{21}}/G_{p_{22}}$. As sintonizações para um PI por Ziegler-Nichols:

$$\text{Malha 1 : } K_c = 0.6163, \tau_I = 3.3061 \text{ s} \quad (6a)$$

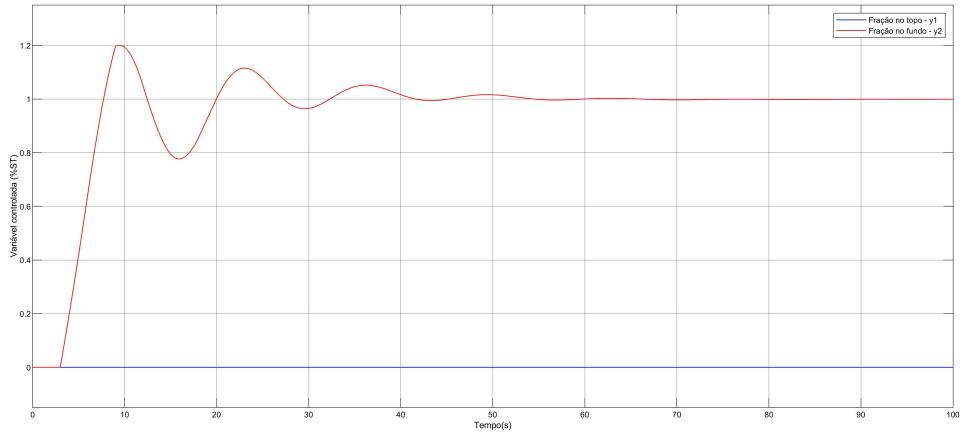
$$\text{Malha 2 : } K_c = -0.1453, \tau_I = 7.1449 \text{ s} \quad (6b)$$

Novamente, para a malha 2 manteve-se a sintonização de McAvoy.

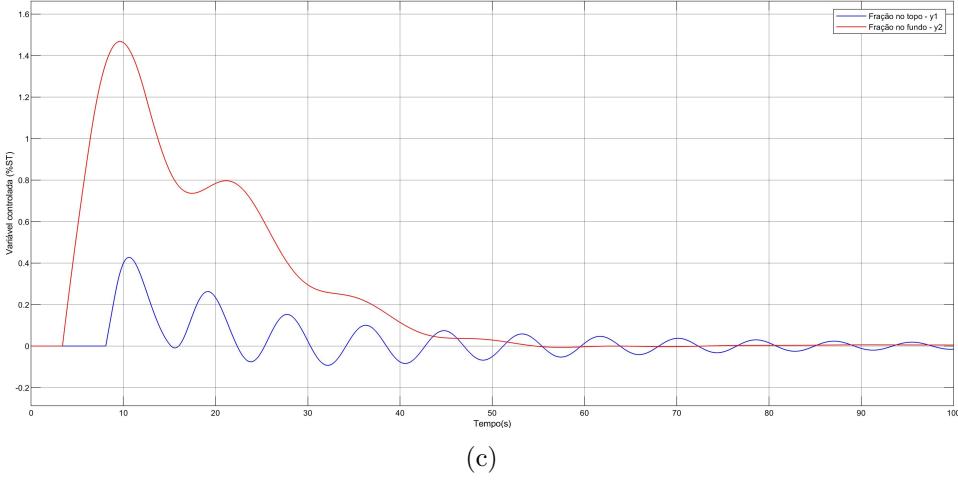
Verifica-se que o desacoplador foi implementado com sucesso, pois a resposta de uma malha não induz resposta em outra malha. As respostas às entradas nas variáveis e na carga parecem adequadas pelo ajuste escolhido.



(a)



(b)



(c)

Figura 9: Simulação da resposta com as duas malhas fechadas no caso de variáveis emparelhadas usando desacopladores simplificados: (a) degrau no ponto-fixo em y_1 , (b) degrau no ponto-fixo em y_2 , (c) degrau no distúrbio.

i

As expressões para o desacoplador ideal são de difícil cômputo para o MATLAB devido à presença de tempos mortos nas matrizes que se deseja inverter. Dessa forma, não foi possível essa implementação. A resposta é a seguinte:

```
Error using \
(line 67) In "SYS1 SYS2", SYS1 must be delay free.
Error in Wood_Berry (line 116) D = Gp \[tf11 0;0 tf22];
```