



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

## Trabalho 3 - Reator

*Lucas William Junges*

30/06/2025

## Lista de Figuras

# Sumário

# 1 Introdução

Na segunda parte deste estudo, foram desenvolvidas e implementadas técnicas avançadas de controle para um reator continuamente agitado, utilizado na produção de cyclopentenol (produto B) a partir de cyclopentadiene (produto A), com a presença de um catalisador diluído em água. O enfoque foi no projeto de um controlador utilizando a técnica de lugar de raízes, comparando seu desempenho com um controlador PI previamente desenvolvido. A análise incluiu simulações detalhadas do sistema não linear para verificar a robustez e eficácia dos controladores propostos.

Nesta terceira parte, o objetivo é enfrentar o desafio adicional de um atraso de medição na concentração de saída do produto B, que ocorre devido ao tempo de deslocamento do produto até o sensor e ao tempo de processamento do sensor, totalizando um atraso de 3 minutos. Este atraso exige um ajuste no sistema de controle da malha principal, desconsiderando as malhas internas e a ação feedforward estudadas anteriormente.

Para abordar este problema, será inicialmente projetado um controle baseado no Preditor de Smith em tempo discreto, visando manter as mesmas características transitórias (tempo de acomodação e pico máximo) e permanentes (erro em regime permanente) obtidas na parte 2. Este controlador deve garantir um ganho estático unitário na relação referência-saída de  $C_B$ , utilizando um filtro de referência, se necessário. A eficácia do Preditor de Smith será avaliada por meio de simulações do modelo linearizado, com foco em respostas a degraus de referência de  $C_B$  e perturbações de  $C_{AF}$ .

Serão realizadas simulações detalhadas do comportamento dinâmico do sistema com o modelo completo não linear utilizando o Simulink. As simulações incluirão cenários semelhantes aos da parte 2, com variações próximas ao ponto de operação e perturbações, para verificar se o sistema atende às especificações de desempenho e robustez. A resposta do sistema ao se afastar do ponto de operação será analisada, permitindo uma compreensão aprofundada da dinâmica do reator sob controle.

Além disso, será explorada a possibilidade de melhorar a resposta do Preditor de Smith utilizando uma versão filtrada deste controlador. A performance deste novo controle será comparada ao controle original, tanto em simulações do modelo linearizado quanto do modelo não linear. Esta análise permitirá avaliar se a inclusão do filtro melhora a resposta do sistema e contribui para uma maior robustez.

A análise incluirá a avaliação de robustez do sistema, a discussão dos resultados, a determinação do controle equivalente e a implementação por equações a diferença. Esta abordagem detalhada visa garantir que o sistema de controle proposto não apenas atenda às especificações iniciais, mas também seja capaz de manter desempenho consistente sob diferentes condições de operação.

O objetivo final desta parte do estudo é aprofundar o conhecimento sobre técnicas de controle avançadas aplicadas a sistemas com atraso. Utilizando o Preditor de Smith e sua versão filtrada, busca-se verificar a eficácia dessas abordagens em cenários realistas de operação através de simulações detalhadas. Esta investigação contribuirá para o desenvolvimento de estratégias de controle mais robustas e eficazes para processos químicos industriais.

## 2 Desenvolvimento

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.

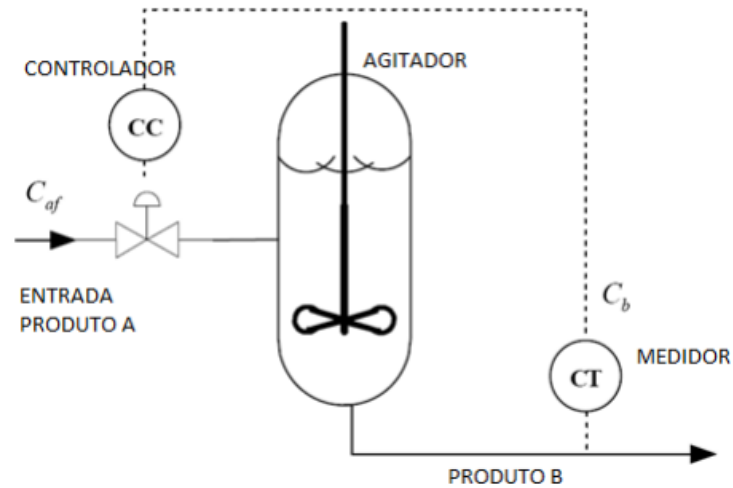


Figura 1: Reator químico

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

### 3.1 Projeto de Controle por Preditor de Smith

a) 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 malha fechada do Preditor de Smith para este sistema. As especificações foram atendidas?

A primeira abordagem consiste na implementação do controle no sistema linearizado, incorporando um atraso de 3 minutos na leitura da concentração de  $C_B$ . De acordo com as especificações, o controlador deve atender ao tempo de assentamento nas perturbações. Para alcançar este objetivo, será utilizada a estrutura do Preditor de Smith filtrado.

$$C_B = \frac{4.81}{(s + 6.94)(s + 1.64)}C_{AF} + \frac{-2.17(s - 5.54)}{(s + 6.94)(s + 1.64)}U \quad (1)$$

$$C_A = \frac{0.8}{(s + 6.9433)}C_{AF} + \frac{4.5067}{s + 6.9433}U \quad (2)$$

Com as funções de transferência definidas, estas serão discretizadas utilizando o comando `c2d` do MATLAB. O período de amostragem utilizado ( $T_s$ ) será de 0.07 segundo, conforme adotado na questão anterior.

```
clear;
clc;
close all;

% Definicao do sistema
s = tf('s');
ts = 0.07;

% Discretizacao de C_B
C_B_Caf = 4.81 / ((s + 6.94) * (s + 1.64));
C_B_U = -2.17 * (s - 5.54) / ((s + 6.94) * (s + 1.64));

C_B_Caf_discrete = c2d(C_B_Caf, ts, 'tustin');
C_B_U_discrete = c2d(C_B_U, ts, 'tustin');

% Discretizacao de Ca
Ca_Caf = 0.8 / (s + 6.9433);
Ca_U = 4.5067 / (s + 6.9433);

Ca_Caf_discrete = c2d(Ca_Caf, ts, 'tustin');
Ca_U_discrete = c2d(Ca_U, ts, 'tustin');
```

```
% Exibicao dos sistemas discretizados
C_B_Caf_discrete
C_B_U_discrete
Ca_Caf_discrete
Ca_U_discrete
```

Função de transferência  $C_B$ - $C_{AF}$  discreta:

$$C_B(z) : \frac{0.004483z^2 + 0.008967z + 0.004483}{z^2 - 1.501z + 0.543} C_{AF}(z) \quad (3)$$

Tempo de amostragem: 0.07s

Função de transferência  $C_B$ - $U$  discreta:

$$C_B : \frac{-0.04658z^2 + 0.02241z + 0.069}{z^2 - 1.501z + 0.543} U(z) \quad (4)$$

Tempo de amostragem: 0.07s

Para o controlador do Preditor de Smith, será utilizado o controlador obtido na parte 2 por meio da técnica de lugar das raízes:

$$C(s) = \frac{0.93s + 1.93}{s} \quad (5)$$

O controlador pode ser discretizado usando a transformação de Tustin da seguinte forma: Primeiro, substituímos  $s$  por  $\frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ :

$$C(z) = 0.93 \left( \frac{\frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + 2.07}{\frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \right)$$

Simplificando, obtemos:

$$C(z) = \frac{0.9928z - 0.8672}{z - 1}$$

Fazendo o sistema completo do Preditor de Smith em Simulink:

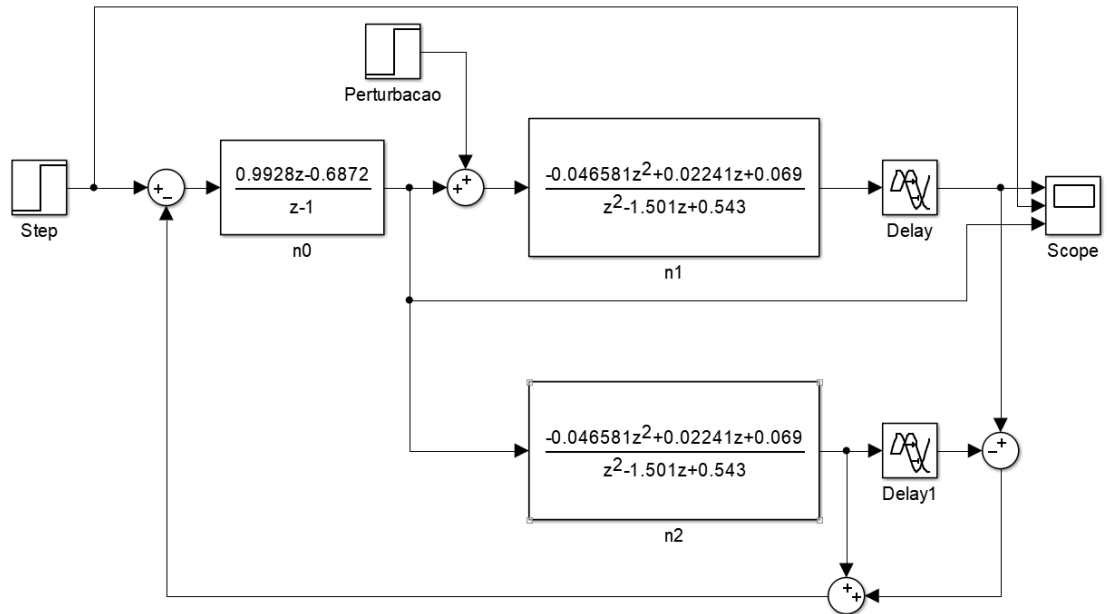


Figura 2: Diagrama de Blocos do sistema discreto com Preditor de Smith

Obtêm-se a resposta ao degrau, entrada degrau e sinal de controle discreto, respectivamente:

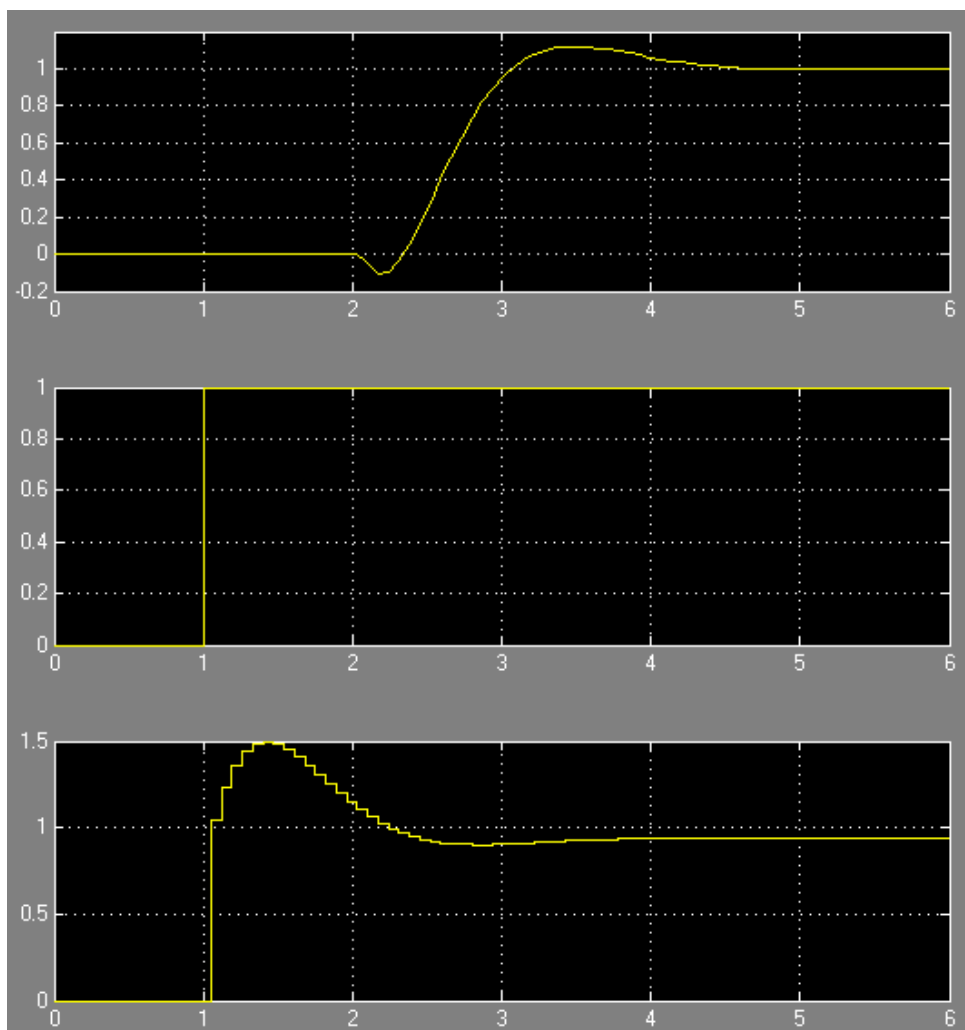


Figura 3: Resposta ao degrau, entrada degrau e sinal de controle discreto



Com um atraso de 3 minutos considerado, o tempo de assentamento que obtivemos foi de 1,74 minuto, um valor muito próximo do esperado. No entanto, será necessário projetar um filtro de referência, pois o pico máximo alcançado excedeu o limite especificado na especificação (5 por cento de ultrapassagem). O filtro a ser projetado precisa cancelar os zeros dominantes presentes no controlador e assegurar um ganho unitário. Os requisitos para o filtro são os seguintes, baseado no controlador encontrado:

$$C(z) = \frac{0.9928z - 0.8672}{z - 1} \quad (6)$$

$$Fr(z) = \frac{0.1256}{0.9928z - 0.8672} \quad (7)$$

Assim, o diagrama de blocos com o filtro de referência incluso é:

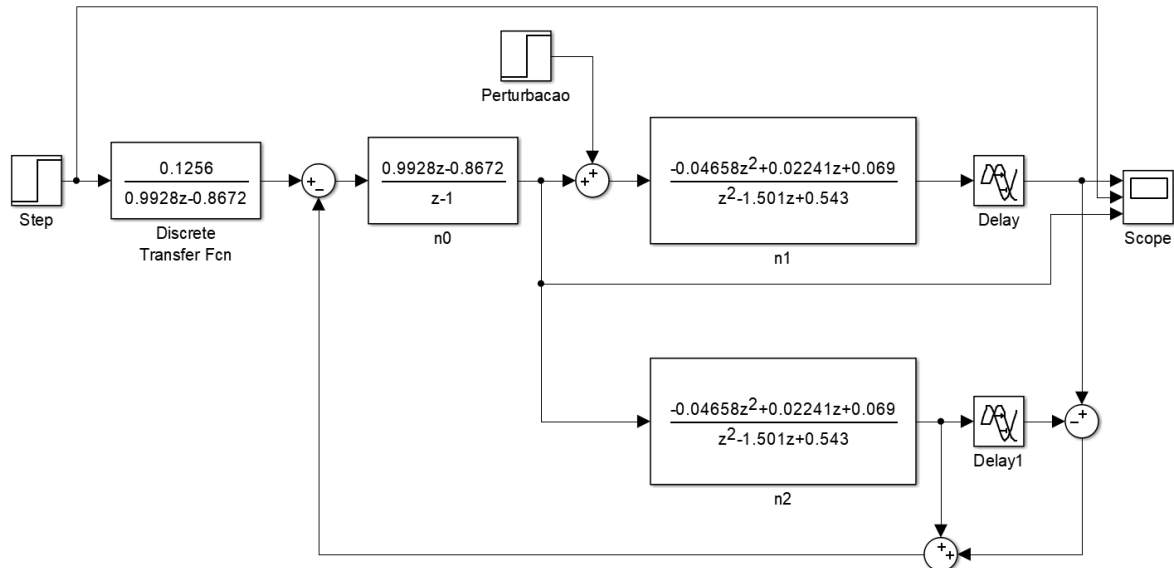


Figura 4: Diagrama de Blocos do sistema discreto com Preditor de Smith e Filtro de Referência

E portanto a nova resposta ao degrau, entrada degrau e sinal de controle discreto, respectivamente é:

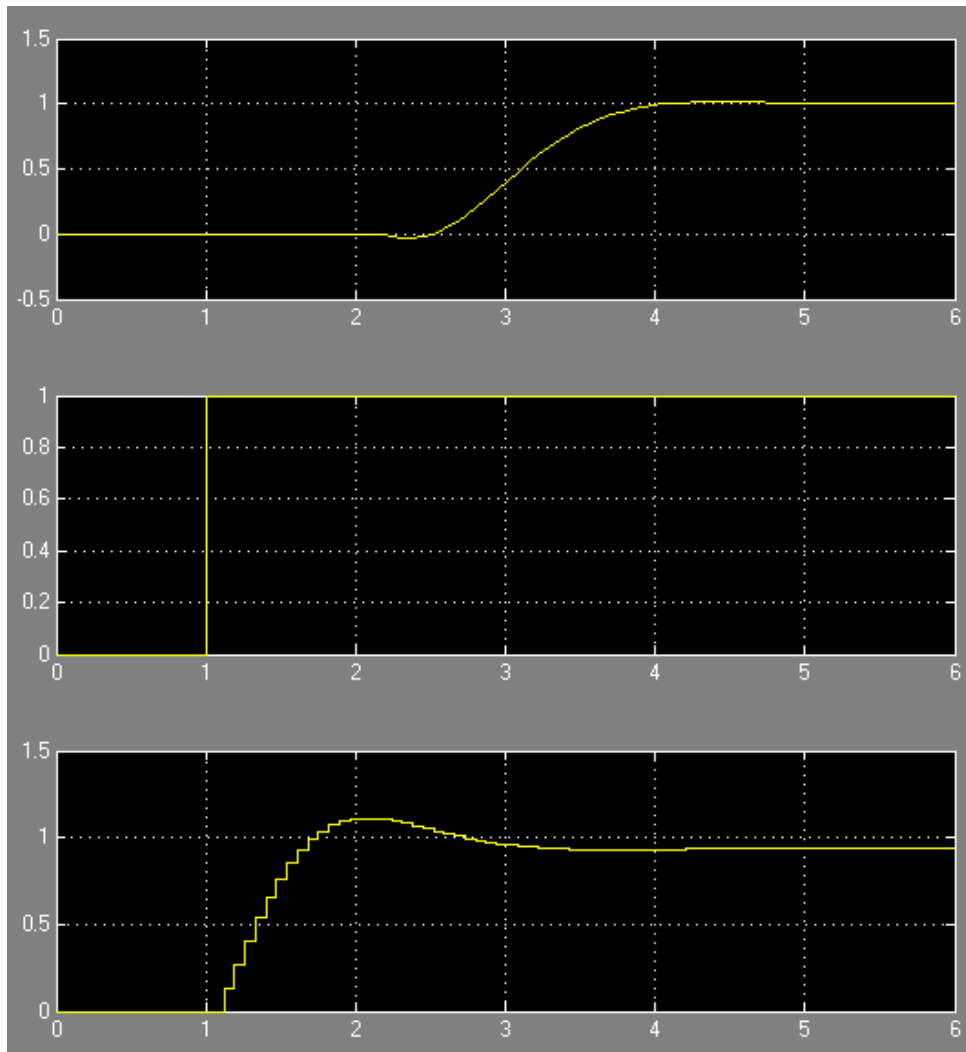


Figura 5: Resposta ao degrau, entrada degrau e sinal de controle discreto com Filtro de Referência

Agora sim a resposta do sistema atende a todas as especificações exigidas. Para análise de perturbação do tipo degrau a resposta ao degrau, entrada degrau e sinal de controle discreto encontradas foram:

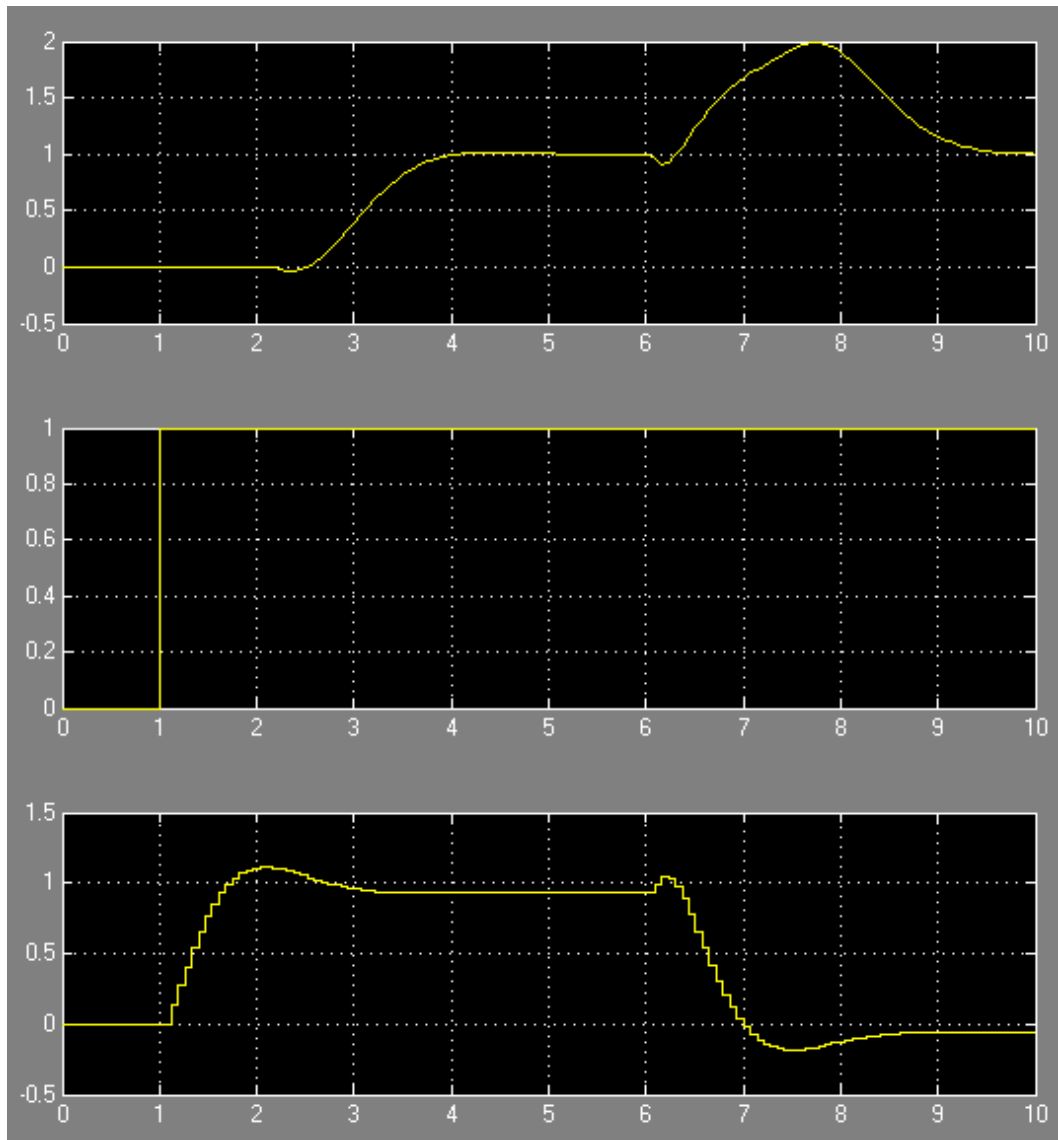


Figura 6: Resposta ao degrau perturbação, entrada degrau e sinal de controle discreto à perturbação com Filtro de Referência

O resultado obtido em relação à perturbação foi aquém do desejado, o que se alinha com as expectativas, considerando que o controlador necessita de 3 segundos para detectar a perturbação e mais 3 segundos para reagir a ela. Adicionalmente, o Preditor de Smith funciona de maneira similar a um controlador de cancelamento, apresentando uma resposta inerentemente mais lenta para a rejeição de perturbações. A aplicação de filtros de predição pode ser uma alternativa para melhorar esse desempenho.

Com a utilização da estrutura do Preditor de Smith, as especificações para o controle da referência foram atendidas, porém as exigências relacionadas à rejeição de perturbações não foram plenamente alcançadas. As soluções potenciais para esta limitação serão exploradas nas próximas seções.

### 3.2 Simulação do comportamento dinâmico

b) Usando Simulink, estude por simulação o comportamento dinâmico do sistema em malha fechada 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. O que acontece com o sistema ao se afastar do ponto de operação? Realize um estudo de robustez para justificar os resultados.

Para analisar o funcionamento do controle com o preditor de Smith no sistema não linear, utilizamos um subsistema que inclui o modelo não linear alimentado por uma concentração constante de  $C_{AF}$  igual a 5.1. Esse subsistema foi integrado à estrutura do preditor de Smith.

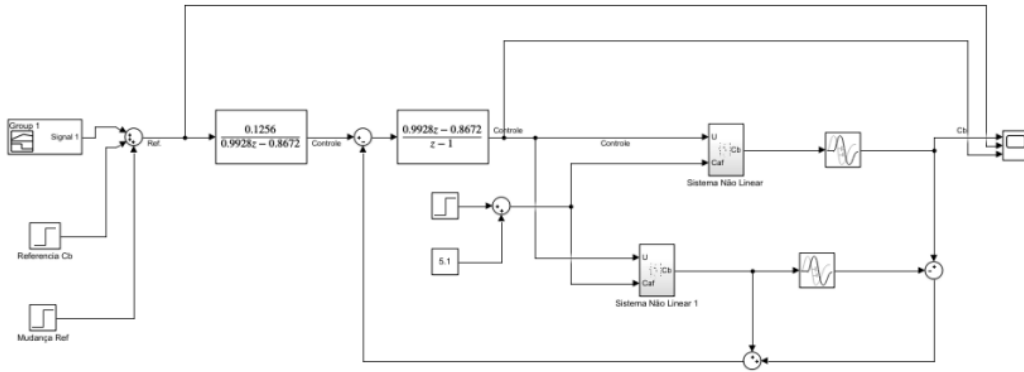


Figura 7: Preditor de Smith com sistema não linear

A resposta a mudanças de referência apresentou um tempo de aproximadamente 1.6 minutos, conforme ilustrado na figura abaixo.

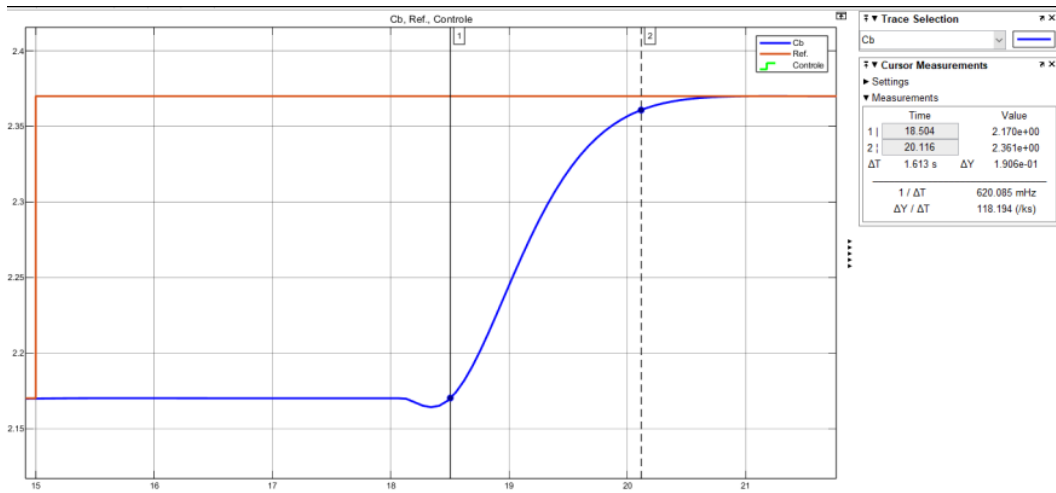


Figura 8: Resposta Y/R no sistema não linear com mudanças do tipo degrau na referência

Inserindo uma perturbação no tempo de 20 minutos com uma amplitude de -0.2 mol/l, observamos a seguinte rejeição da perturbação.

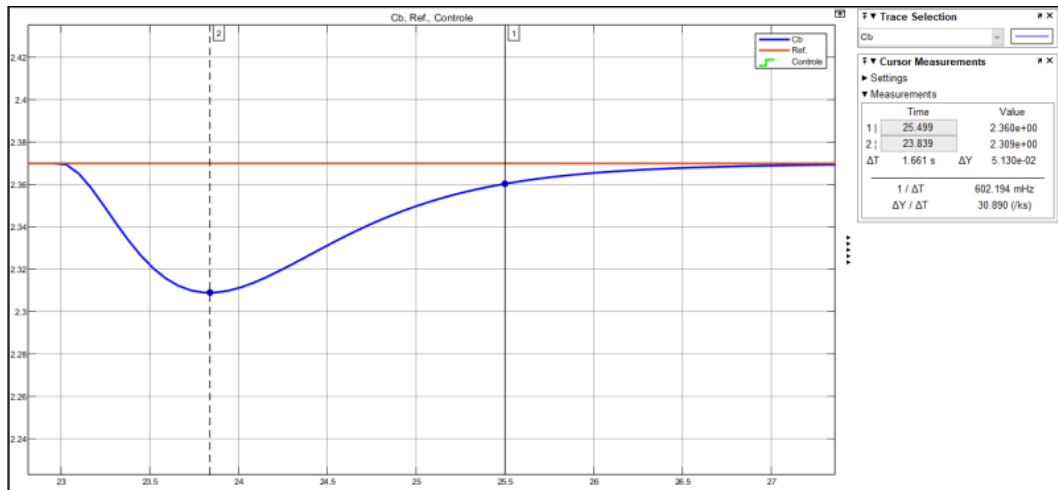


Figura 9: Resposta Y/Q no sistema não linear com mudanças do tipo degrau na perturbação

É possível notar que o tempo de rejeição das perturbações é satisfatório, embora ele aumente conforme a amplitude da perturbação se torna maior.

Próximo ao ponto de operação, o sistema de controle consegue estabilizar o sistema na referência desejada, mesmo com a inserção de perturbações. Vamos agora analisar grandes variações do ponto de operação.

Quando inserimos uma grande variação na referência, afastando-a consideravelmente do ponto de operação, verificamos que o sistema de controle não consegue fazer com que  $C_B$  atinja o valor de referência.

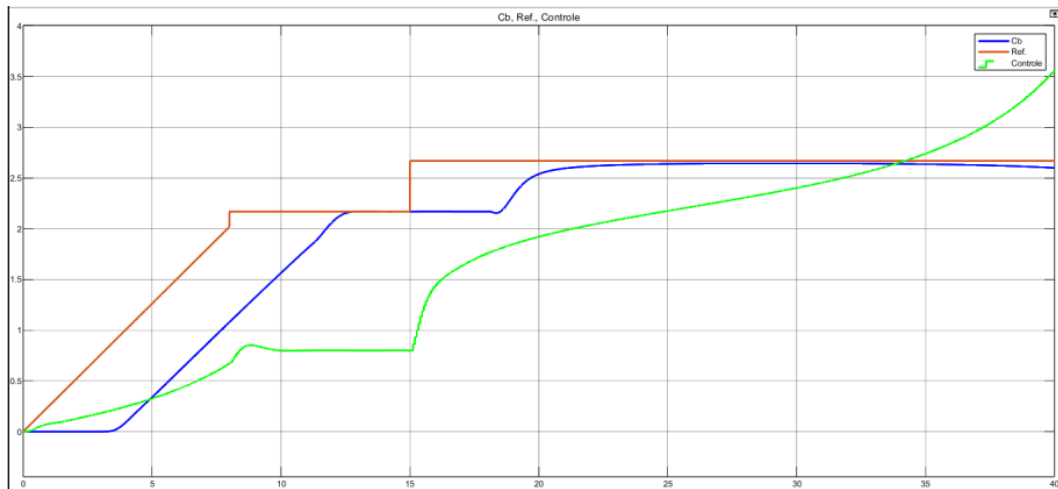


Figura 10: Variação Grande de Referência

Podemos concluir que o preditor de Smith apresenta certa robustez. Comparando com a parte 2, a variação máxima do ponto de operação que ainda foi controlada foi bastante próxima neste experimento, começando a se desviar com uma variação de 0.5 na referência de  $C_B$ .

Para realizar um estudo sobre a robustez do sistema utilizando a planta linearizada, consideramos as seguintes equações:

$$G_i(s) = \frac{-2.17(s - 5.54)e^{-3s}}{(s + 6.94)(s + 1.64)}$$

E fizemos o seguinte código para análise:

```
clear all
close all
clc
s = tf('s')
L = 3;
tau1 = 1 / 6.94;
tau2 = 1 / 1.64;
K = -2.17 * tau1 * tau2;
Gn = K * (s - 5.54) / (tau1 * s + 1) * (tau2 * s + 1) * exp(-L *
    s)
Gi = 1.1 * K / (0.9 * tau1 * s + 1) * (0.9 * tau2 * s + 1) * exp
    (-(L + 0.1 * L) * s)
dk = [0.9, 1.1]
dt1 = [0.85, 1.15]
dt2 = [0.85, 1.15]
dl = L * [-0.1, 0.1]
Gnf = @(w) K .* (w * 1i - 5.54) ./ (tau1 * w * 1i + 1) .* (tau2 *
    w * 1i + 1) .* exp(-L * w * 1i);
Gif = @(w, k, l, t1, t2) k * K .* (w * 1i - 5.54) ./ (t1 * tau1 *
    w * 1i + 1) .* (t2 * tau2 * w * 1i + 1) .* exp(-(L + l) * w *
    1i);
w = logspace(-2, 4, 200);
Giv = {};
Gnv = Gnf(w);
dGi = {};
DGi = {};
for i = 1:2
    for j = 1:2
        for k = 1:2
            for z = 1:2
                Giv{i, j, k, z} = Gif(w, dk(i), dl(j), dt1(k),
                    dt2(z));
                dGi{i, j, k, z} = (Giv{i, j, k, z} ./ Gnv) - 1;
                DGi{i, j, k, z} = Giv{i, j, k, z} - Gnv;
            end
        end
    end
end
figure(1)
for i = 1:2
    for j = 1:2
        for k = 1:2
            for z = 1:2
                semilogx(w, abs(DGi{i, j, k, z}));
                hold on
            end
        end
    end
end
end
```

```

grid on
title('Erro aditivo')
figure(2)
for i = 1:2
    for j = 1:2
        for k = 1:2
            for z = 1:2
                semilogx(w, abs(dGi{i, j, k, z}));
                hold on
            end
        end
    end
end
end
grid on
title('Erro multiplicativo')
%cota do erro maximo
rinf = 2.5
r0 = 0.1
tau = rinf / 2.5;
Emaxf = @(w) (tau * w * 1i + r0) ./ ((tau / rinf) * w * 1i + 1);
Emax = Emaxf(w)
semilogx(w, abs(Emax), 'k--', 'linewidth', 2)
C = 0.93 * (s + 1.93) / s;
G = (-2.17 * (s - 5.54)) / (s + 6.94) * (s + 1.64) * (3 * s + 1);
Ceq = C / (1 + C * G * (1 - (1 / (3 * s + 1))));
YR = Ceq * G / (1 + Ceq * G);
figure(3)
semilogx(w, abs(1 ./ Emaxf(w)), 'k--', 'linewidth', 2)
hold on
bode(YR)

```

Os seguintes gráficos foram obtidos:

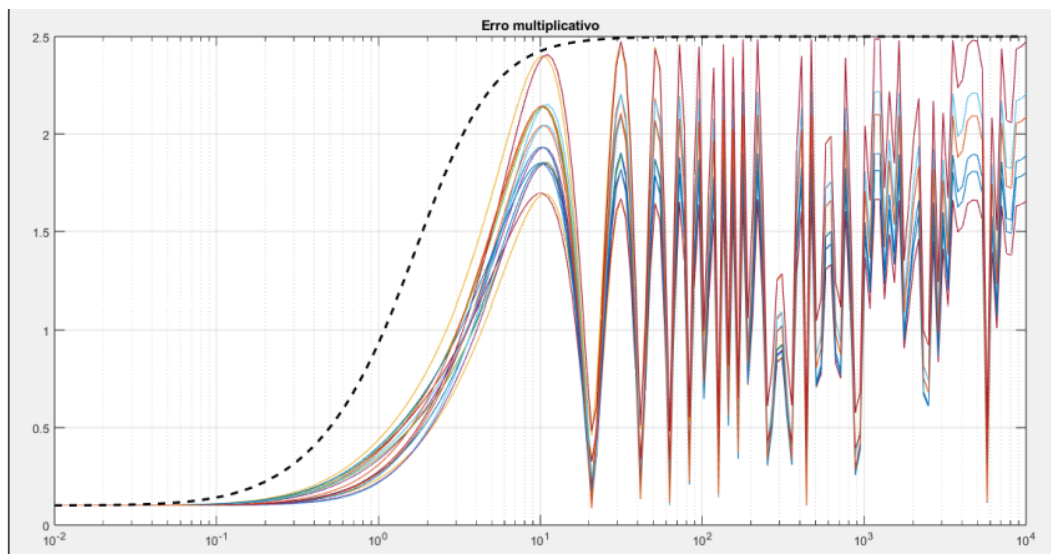


Figura 11: Curvas de erros multiplicativos

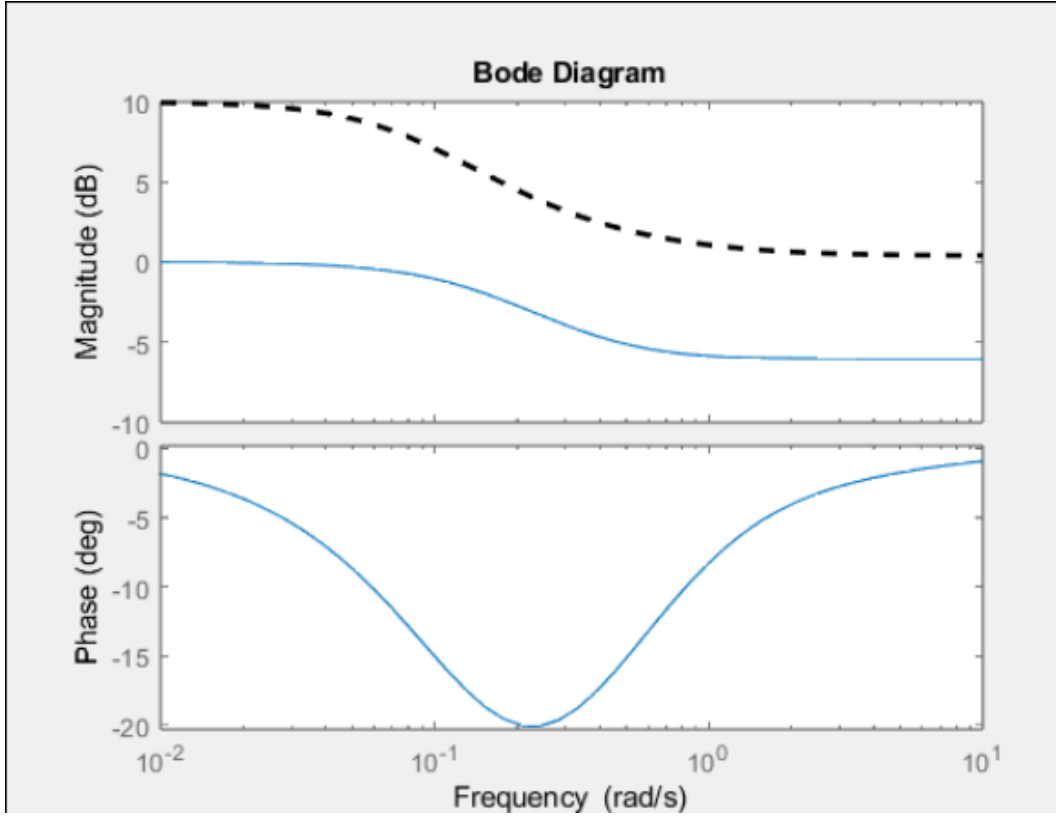


Figura 12: Análise de Robustez

É evidente que o nosso sistema apresenta uma robustez significativa. Isso explica porque a variação máxima do ponto de operação que ainda foi possível controlar foi muito próxima neste experimento, começando a se desviar com uma variação de 0.5 na referência de  $C_B$ .

### 3.3 Preditor de Smith Filtrado

c) Considere agora que deseja melhorar a resposta do Preditor de Smith. Utilize então um Preditor de Smith filtrado para o controle de  $C_B$ . O 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.

$$C_B(z) = \frac{(-0.04658z^2 + 0.02241z + 0.069)}{(z^2 - 1.501z + 0.543)}U(z) \quad (8)$$

$$C_B(z) = \frac{(-0.04658z^2 + 0.02241z + 0.069)}{(z - 0.608)(z - 0.893)}U(z) \quad (9)$$

Devemos realizar o desenvolvimento de um Preditor de Smith com filtro de projeção, o qual a estrutura pode ser vista abaixo.

Dessa forma, é visto que podemos utilizar a estrutura do Preditor de smith projetada na questão 1 deste relatório, onde temos

$$C(z) = \frac{0.9928z - 0.8672}{z - 1} \quad (10)$$



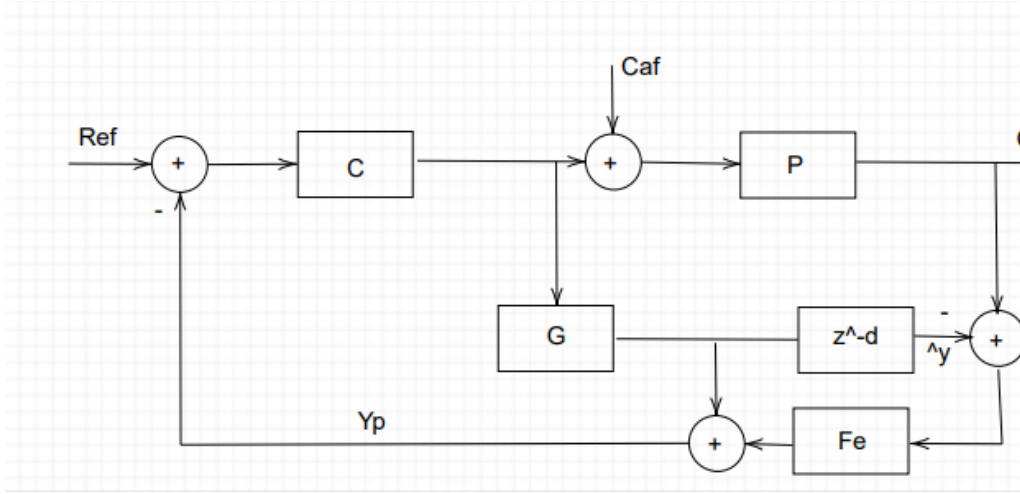


Figura 13: Diagrama de Blocos de Preditor de Smith Filtrado

$$Fr(z) = \frac{0.1256}{0.9928z - 0.8672} \quad (11)$$

Necessitando apenas realizar o projeto do filtro de projeção.

Para fazer o desenvolvimento de filtro de projeção temos que atender duas condições, são elas, ganho do filtro deve ser unitário e a seguinte equação deve ser atendida:

$$1 - Fe \cdot z^{-d}|_{(z=pzi)} = 0 \quad (12)$$

Onde pz são os polos indesejados. Como temos uma planta de segunda da ordem, o filtro de projeção deve ter a seguinte estrutura:

$$Fe(z) = \frac{a^2z + bz + c}{(z - \lambda)^2} \quad (13)$$

Vamos iniciar obtendo o valor de  $\lambda$ , utilizando o tempo de assentamento desejado e a aproximação para polos reais e iguais. Para facilitar, obtemos inicialmente o polo desejado no contínuo e depois realizaremos a discretização.

Polo desejado no contínuo:

$$t_{(5\%)} = \frac{3}{pd} = 1.5 \rightarrow pd = \frac{3}{1.5} = 2 \quad (14)$$

Passando para o discreto, temos:

$$\lambda = e^{(-pd.Ts)} = e^{(-2*0.07)} = 0.869 \quad (15)$$

Aplicando o filtro de projeção na primeira condição:

$$Fe(1) = 1 \Rightarrow \frac{a + b + c}{(a - \lambda)^2} = 1 \quad (16)$$

Obtemos a seguinte equação:

$$a + b + c = (1 - \lambda)^2 \quad (17)$$

Aplicando o filtro de projeção na segunda condição:

$$1 - Fe * z^{-d}|_{z=pz_i} = 0 \quad (18)$$

$$1 - \frac{apz_i^2 + bpz_i + c}{(pz_i + \lambda)^2} * pz_i^{-d} = 0 \quad (19)$$

Chegamos na seguinte equação:

$$a * pz_i^2 + b * pz_i + c = (pz_i - \lambda)^2 * pz_i^d \quad (20)$$

Como temos dois polos indesejados, vamos obter as seguintes iguais com valores dos polos indesejados. Com essas duas e mais a equação obtida pela primeira condição obtemos o seguinte sistema de equações.

$$a + b + c = (1 - \lambda)^2 \quad (21)$$

$$a * pz_1^2 + b * pz_1 + c = (pz_1 - \lambda)^2 * pz_1^d \quad (22)$$

$$a * pz_2^2 + b * pz_2 + c = (pz_2 - \lambda)^2 * pz_2^d \quad (23)$$

Tendo os valores para  $pz_1 = 0.608$ ,  $pz_2 = 0.893$ ,  $d = 43$ ,  $\lambda = 0.869$ . Temos:

$$a + b + c = (1 - 0.869)^2 \quad (24)$$

$$a * (0.608)^2 + b * 0.608 + c = (0.608 - 0.869)^2 * 0.608^{43} \quad (25)$$

$$a * (0.893)^2 + b * 0.893 + c = (0.893 - 0.869)^2 * 0.893^{43} \quad (26)$$

Resolvendo o sistema de equações acima, obtemos os seguintes valores para os parametros do filtro de projeção

$$a = 0.409141 \quad (27)$$

$$b = -0.61412 \quad (28)$$

$$c = 0.222141 \quad (29)$$

Dessa forma, obtemos o seguinte filtro de projeção:

$$Fe(z) = \frac{0.409141z^2 - 0.61412z + 0.222141}{(z - 0.869)^2} \quad (30)$$

$$Fe(z) = \frac{0.409141z^2 - 0.61412z + 0.222141}{z^2 - 1.738 + 0.755} \quad (31)$$

Agora iremos analisar o comportamento do sistema linear com o Preditor de Smith Filtrado, adicionando o filtro de projeção na estrutura do Preditor de Smith, obtemos:

Contudo, para que possamos implementar o filtro desenvolvido, temos que alterar a estrutura do Preditor de Smith afim de obter uma equivalente estável. Dessa forma, chegamos no seguinte Preditor de Smith filtrado equivalente estável e implementável.

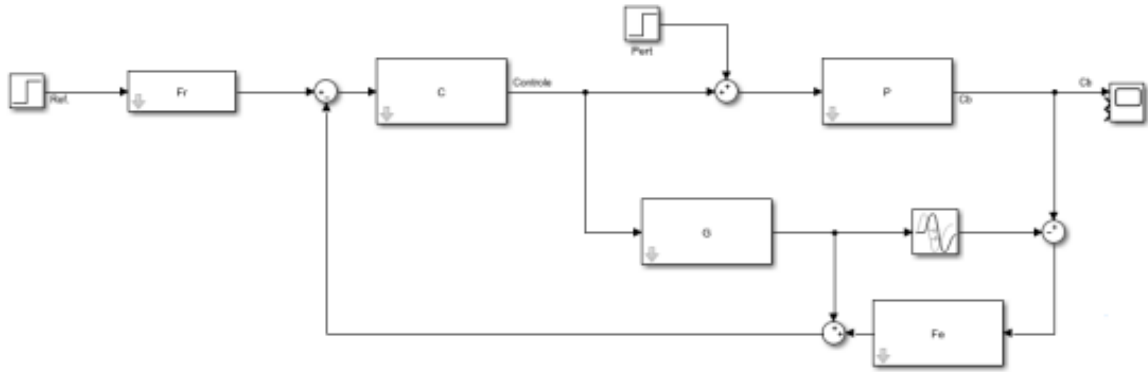


Figura 14: Estrutura Preditor de Smith Filtrado

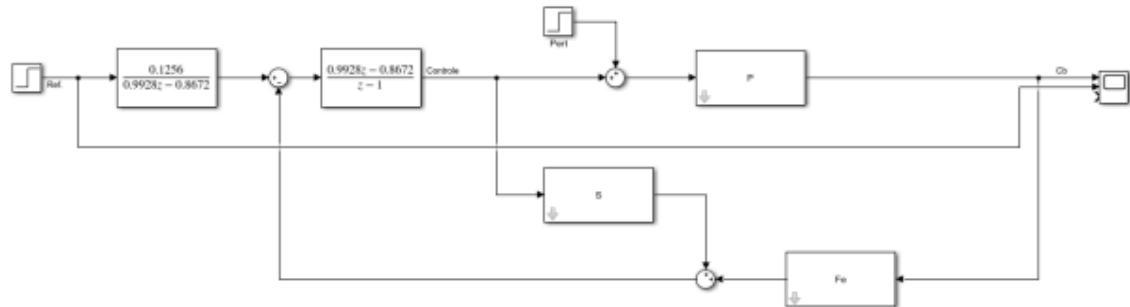


Figura 15: Estrutura Preditor de Smith Filtrado Implementavel (Modelo linear)

Onde:

$$S = G(z) * (1 - Fe(z)z^{-d}) \quad (32)$$

$$P = G(z) * z^{-d} \quad (33)$$

Dessa forma, obtemos a seguinte resposta a mudanças do tipo degrau na referencia:

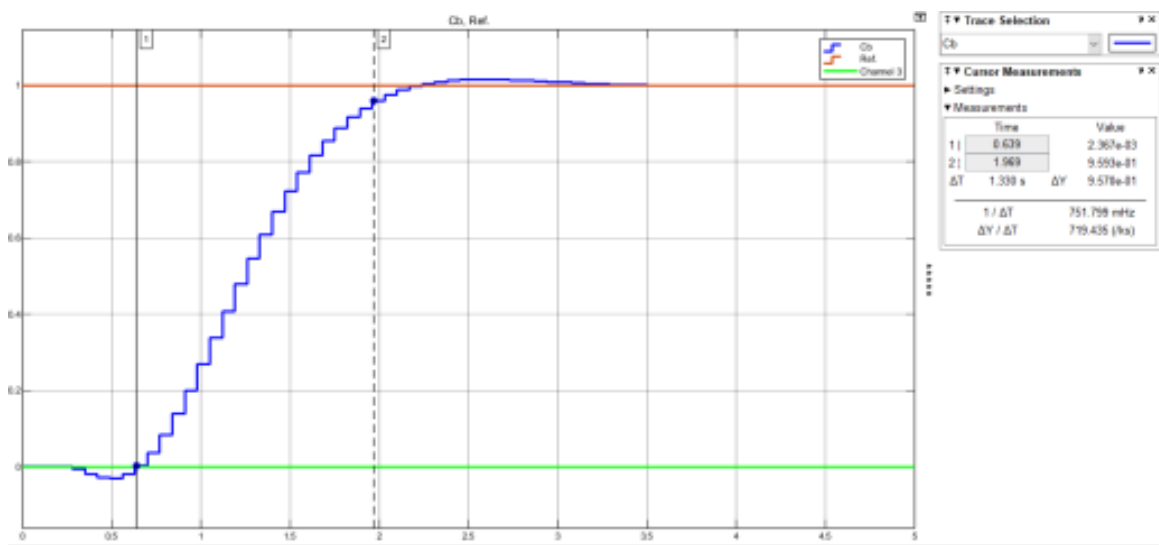


Figura 16: Respostas P.S.F a mudanças de degrau na referência (Modelo linear)

Agora, obtemos a seguinte resposta a mudanças do tipo degrau na perturbação:

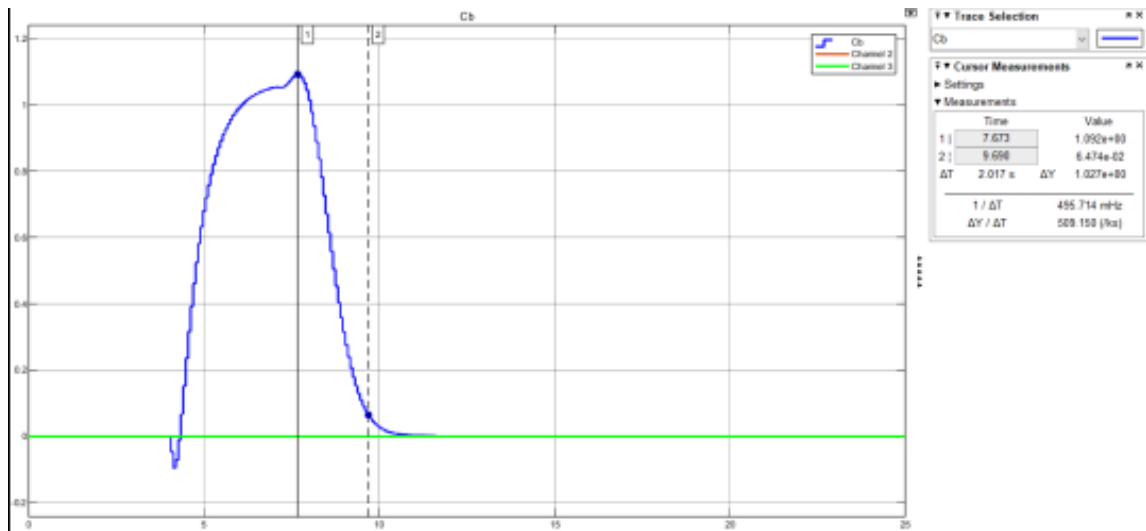


Figura 17: Respostas P.S.F a mudanças de degrau na perturbação (Modelo linear)

Assim, para o sistema não linear temos a seguinte estrutura:

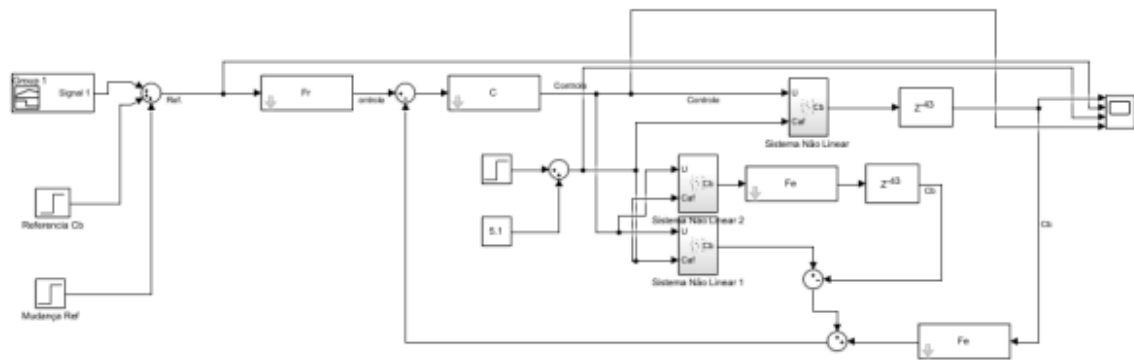


Figura 18: Estrutura Preditor de Smith Filtrado Implementavel (Modelo não linear)

Onde, obtemos a seguinte resposta a mudanças do tipo degrau na referência:

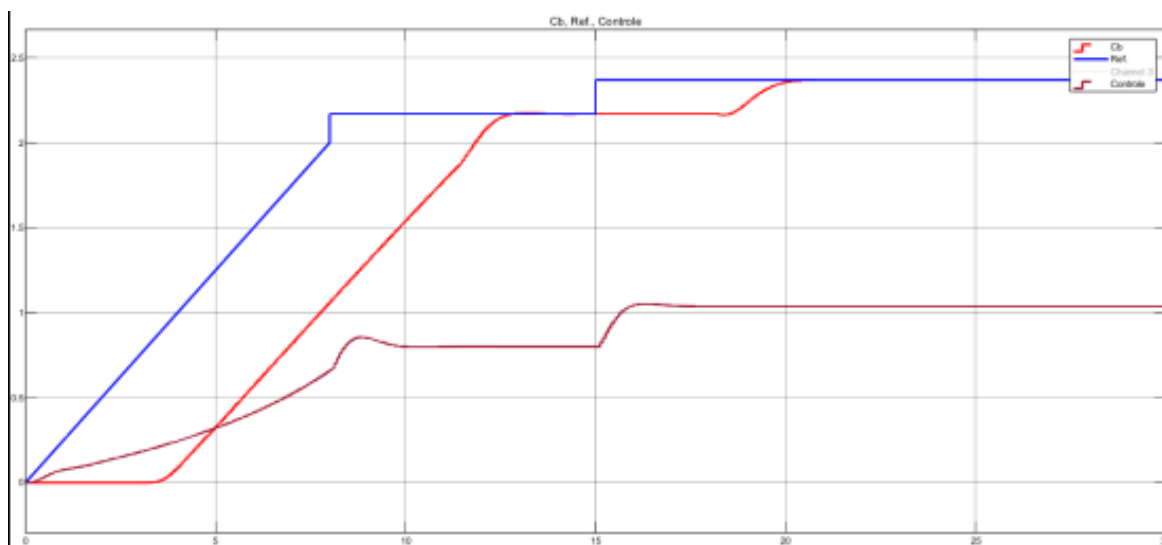


Figura 19: Respostas P.S.F a mudanças de degrau na referência (Modelo não linear)

Neste caso, obtemos um tempo de assentamento de 1.52 minutos, oque visto pelo grupo é aceitavel.

E tambem a seguinte resposta para mudanças do tipo degrau na perturbao:

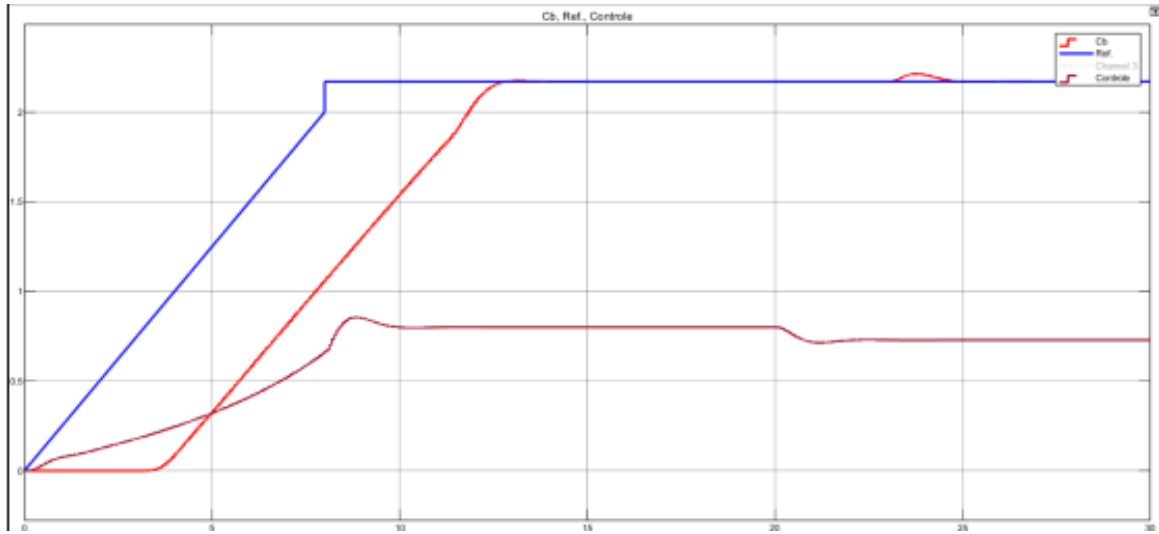


Figura 20: Respostas P.S.F a mudanças de degrau na perturbao (Modelo não linear)

Para mudanças do tipo degrau, obtemos o tempo de assentamento de aproximadamente um minuto.

Para estudar a robustez do sistema utilizamos o código anterior e multiplicamos  $\frac{Y}{R}$  pelo filtro  $\mathcal{F}_e$  e obtivemos o seguinte gráfico:

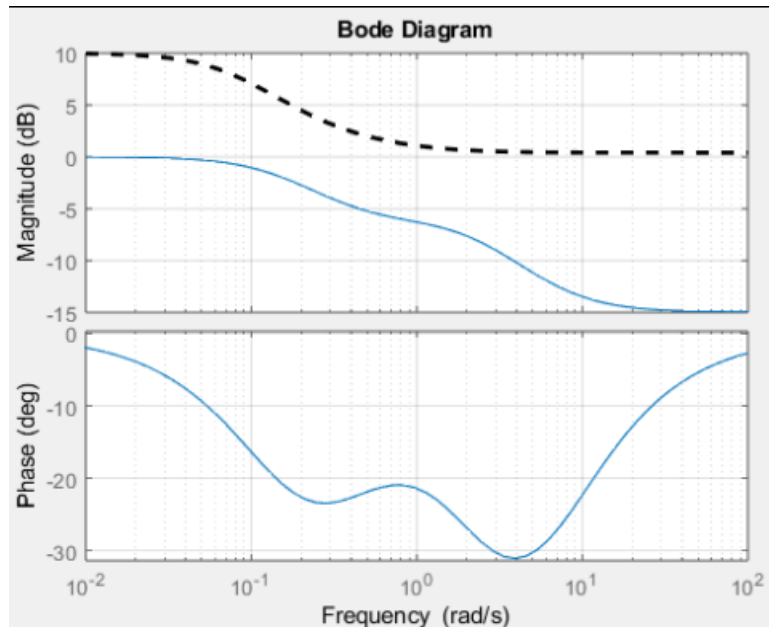


Figura 21: Análise de Robustez P.S Filtrado

Como podemos ver, o uso do filtro piorou um pouco a robustez do sistema no caso linear, tornando-o mais suscetivel a mudanças e variaes em torno do ponto de operao.

 possivel através do Preditor de Smith filtrado se obter uma estrutura de controle realimentado equivalente como vista abaixo.

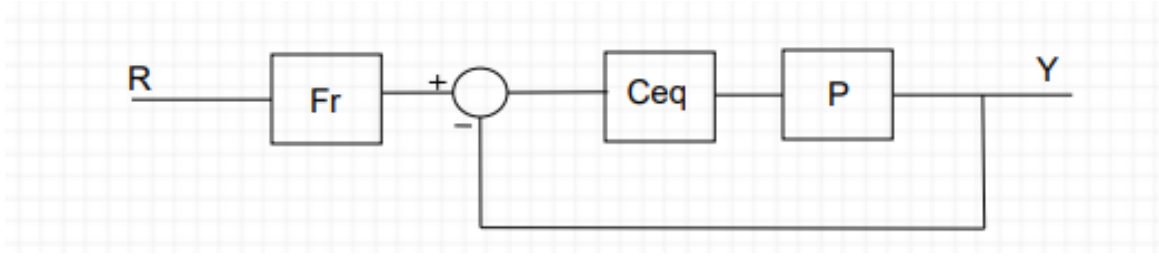


Figura 22: Diagrama de Blocos Preditor de Smith Filtrado

Onde o controlador equivalente é dado da seguinte forma:

$$Ceq = \frac{Nc * Fe}{Dc + NcNg * Dx} \quad (34)$$

Onde:

$$Dx = \frac{1 - Fe * e^{-Ls}}{Dg} \quad (35)$$

Utilizando o matlab, chegamos no seguinte controlador equivalente:

```
Ceq =

      0.42589 z^43 (z-0.893) (z-0.8928) (z-0.8735) (z-0.8691) (z-0.8689) (z-0.6082)
-----
(z-1) (z-0.893) (z-0.8735) (z^2 - 1.738z + 0.7552) (z^2 + 1.728z + 0.7492) (z^2 - 1.986z + 0.9994)
(z^2 + 1.714z + 0.7638) (z^2 - 1.929z + 0.9809) (z^2 + 1.666z + 0.7787) (z^2 - 1.827z + 0.949)
(z^2 + 1.578z + 0.7907) (z^2 - 1.693z + 0.9223) (z^2 + 1.452z + 0.8006) (z^2 - 1.533z + 0.9033)
(z^2 + 1.293z + 0.8089) (z^2 - 1.346z + 0.8893) (z^2 + 1.103z + 0.8163) (z^2 - 1.135z + 0.8784)
(z^2 + 0.888z + 0.8231) (z^2 - 0.9034z + 0.8693) (z^2 + 0.6519z + 0.8294) (z^2 - 0.6552z + 0.8615)
(z^2 + 0.4z + 0.8356) (z^2 - 0.3954z + 0.8545) (z^2 + 0.1378z + 0.8417) (z^2 - 0.1292z + 0.848)
```

Figura 23: Controlador equivalente do P.S.F

Como podemos observar o controlador equivalente possui uma ordem bastante elevada, o que dificultaria bastante a sua implementação, portanto, o grupo atribui ao preditor de smith o titulo de uma opção mais adequada para a solução do problema.