



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAIBA
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALYSSON BATISTA DE SOUZA
FABRÍCIO DA SILVA LEITÃO
GABRIEL BARBOSA DO NASCIMENTO**

Projeto 4 – Sistemas de Controle I

**JOÃO PESSOA
Junho de 2023**

ALYSSON BATISTA DE SOUZA
FABRÍCIO DA SILVA LEITÃO
GABRIEL BARBOSA DO NASCIMENTO

PROJETO 4 – SISTEMAS DE CONTROLE I

Relatório referente à disciplina de Sistemas de controle 1 , ministrada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, durante o semestre 2023.1, orientado pelo professor Dr. Ademar Gonçalves da Costa Júnior

João Pessoa
Junho de 2023

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito 1	7
Figura 2 – Modelo experimental	9
Figura 3 – Implementação do circuito no simulink	9
Figura 4 – Resposta ao degrau do experimento	10
Figura 5 – Resposta ao degrau do experimento	10
Figura 6 – Resposta ao degrau do método Ziegler-Nichols	12
Figura 7 – Resposta ao degrau do método Smith 1° ordem	13
Figura 8 – Resposta ao degrau do método Sundaresan-Krishnaswang	14
Figura 9 – Resposta ao degrau do método Broida	16
Figura 10 – Resposta ao degrau do método Broida	18
Figura 11 – Resposta ao degrau do método Harriot	19
Figura 12 – Resposta ao degrau do método Mollenkamp	22
Figura 13 – Todos os métodos	22
Figura 14 – Simulação feita no Simulink para a obtenção dos índices estatísticos	23
Figura 15 – Comparação do experimento com método de smith 1° ordem	25
Figura 16 – Simulação dos 3 controladores <i>PID</i> no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).	28
Figura 17 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador	28
Figura 18 – Simulação dos 3 controladores <i>PID</i> CHR no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).	31
Figura 19 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador CHR	31
Figura 20 – Simulação dos 3 controladores <i>PID</i> CHR com critério de 20% de overshoot no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).	34
Figura 21 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador CHR com critério de 20% de overshoot	34
Figura 22 – Simulação dos 3 controladores <i>PID</i> IMC no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).	37
Figura 23 – Comparação entre os 3 métodos IMC e o sistema sem controlador	37
Figura 24 – Compensador por atraso no simulink.	39
Figura 25 – Compensador por atraso do experimento	40
Figura 26 – Simulação do compensador por atraso do projeto 3.	40
Figura 27 – Compensador por avanço no simulink.	41
Figura 28 – Compensador por avanço do experimento	42
Figura 29 – Simulação do compensador por avanço do projeto 3.	42
Figura 30 – Compensador por avanço e atraso no simulink.	43
Figura 31 – Compensador por avanço e atraso do experimento	44

Figura 32 – Simulação do compensador por avanço e atraso do projeto 3.	44
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Validação dos métodos.	24
Tabela 2 – Ziegler-Nichols IAE e ITAE.	38
Tabela 3 – CHR IAE e ITAE.	38
Tabela 4 – CHR com 20% de overshoot IAE e ITAE.	38
Tabela 5 – IMC IAE e ITAE.	38

Sumário

1	ITEM 1	7
1.1	Experimento	8
1.1.1	Método Ziegler-Nichols	11
1.1.2	Método Smith 1º ordem	11
1.1.3	Método de Sundaresan-Krishnaswang	13
1.1.4	Método de Broida	14
1.1.5	Método de Smith de 2º ordem	16
1.1.6	Método de Harriot	17
1.1.7	Método Mollenkamp	19
1.1.8	Validando os métodos utilizando com índices estatísticos	23
2	ITEM 2	25
3	ITEM 3	26
3.1	Método Ziegler-Nichols	26
3.2	Método CHR	29
3.3	Método CHR com critério de 20% de overshoot	32
3.4	Método IMC	35
3.5	Avaliação dos controladores com índices qualitativos IAE e ITAE.	38
4	ITEM 4	39
4.1	Atraso de fase	39
4.2	Avanço de fase	41
4.3	Avanço e atraso de fase	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45

1 Item 1

A primeira etapa do processo foi o modelamento matemático do circuito 1, apresentado na Figura 1, proposto em aula para desenvolvimento deste projeto.

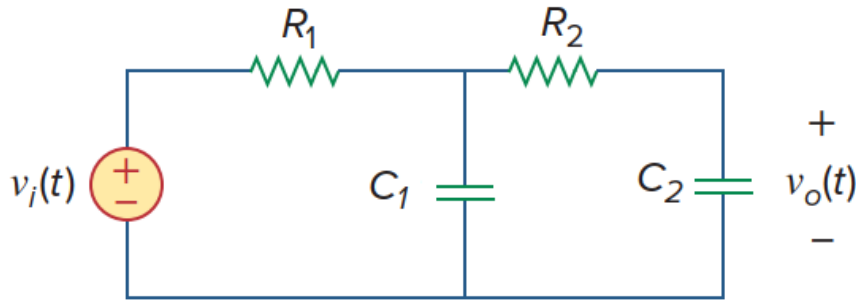


Figura 1 – Circuito 1

$$C_1 = 10\mu F \implies Z_{C_1} = \frac{1}{j\omega C_1} \implies Z_{C_1} = \frac{1}{sC_1} = \frac{100K}{s}$$

$$C_2 = 1\mu F \implies Z_{C_2} = \frac{1}{j\omega C_2} \implies Z_{C_2} = \frac{1}{sC_2} = \frac{1M}{s}$$

$$Z_{eq} = Z_{C_1} // (R_2 + Z_{C_2})$$

$$Z_{eq} = \frac{\frac{100K}{s} \times (100 + \frac{1M}{s})}{\frac{100K}{s} + 100K + \frac{1M}{s}} = \frac{\frac{100K}{s} \times 100K(1 + \frac{10}{s})}{100K + \frac{1,1M}{s}} = \frac{\cancel{\frac{100K}{s}} \times 100K(\frac{s+10}{s})}{\cancel{\frac{100K}{s}}(11 + s)}$$

$$Z_{eq} = \frac{100K(\frac{s+10}{s})}{(11 + s)}$$

$$Z_{eq} = \frac{100K(s + 10)}{s(11 + s)} \quad (1)$$

Regra do divisor de tensão

$$V_o(s) = \frac{Z_{C_2}}{R_2 + Z_{C_2}} \times V_1(s) \quad (2)$$

$$V_1(s) = \frac{Z_{eq}}{R_1 + Z_{eq}} \times V_i(s) \quad (3)$$

substituindo (3) em (2)

$$V_o(s) = \frac{Z_{C_2}}{R_2 + Z_{C_2}} \times \frac{Z_{eq}}{R_1 + Z_{eq}} \times V_i(s)$$

$$V_o(s) = \frac{\frac{1M}{s}}{100K + \frac{1M}{s}} \times \frac{Z_{eq}}{R_1 + Z_{eq}} \times V_i(s)$$

Portanto a função de transferência é:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1M}{s}}{100K + \frac{1M}{s}} \times \frac{Z_{eq}}{R_1 + Z_{eq}} \quad (4)$$

Substituindo (1) em (4)

$$G(s) = \frac{\frac{1M}{s}}{100K + \frac{1M}{s}} \times \frac{\left[\frac{100K(s+10)}{s(11+s)} \right]}{180K + \left[\frac{100K(s+10)}{s(11+s)} \right]}$$

$$G(s) = \frac{1M}{\cancel{100Ks+1M}} \times \frac{\cancel{100Ks+1M}}{180Ks(11+s) + 100Ks + 1M}$$

$$G(s) = \frac{1M}{180Ks^2 + 1,98Ms + 100Ks + 1M}$$

$$G(s) = \frac{1M}{180Ks^2 + 2,08M + 1M}$$

$$G(s) = \frac{5,56}{s^2 + 11,55s + 5,56}$$

1.1 Experimento

1. Com o uso de técnicas de identificação de modelos matemáticos (ver item 8.1a), obtenham modelos matemáticos de primeira ordem e de segunda ordem que possam representar o comportamento matemático do circuito elétrico em questão (deverão usar os métodos apresentados, justificando seu uso ou não). Escolham uma faixa de operação entre 0 e 5 V (ex: 1 e 2.5 V - tensões acima do valor máximo podem levar a queima da placa de Arduino), e validem o modelo matemático utilizando índices estatísticos (ver item 8.1a no Classroom);

Inicialmente, montamos o experimento com a faixa de tensão de 0 à 3 volts. Com isso, conseguimos gerar o gráfico de curva de carga do capacitor e com esse gráfico podemos pegar os pontos para realizar os cálculos matemáticos para a obtenção dos métodos.

Realizamos a implementação do circuito descrito no Simulink seguindo o seguinte procedimento: o sinal de entrada (ou seja, a tensão na entrada do circuito) foi conectado

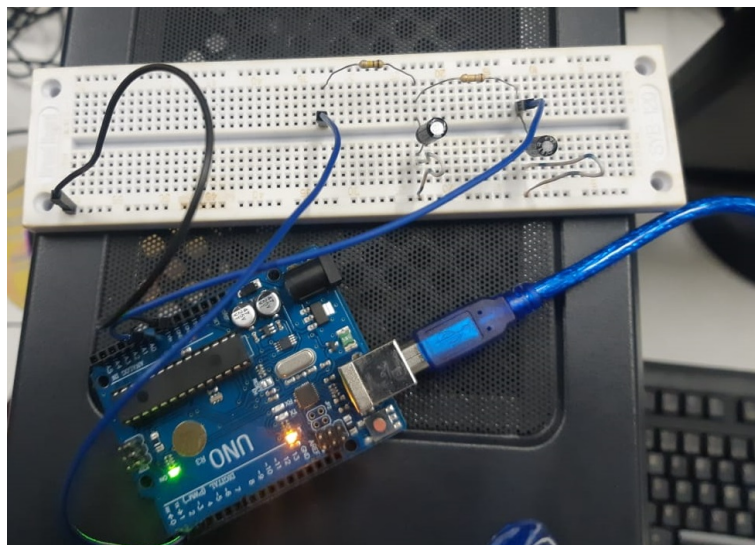


Figura 2 – Modelo experimental

ao pino 3, enquanto a saída (ou seja, a informação da tensão no segundo capacitor) foi obtida a partir do pino A0.

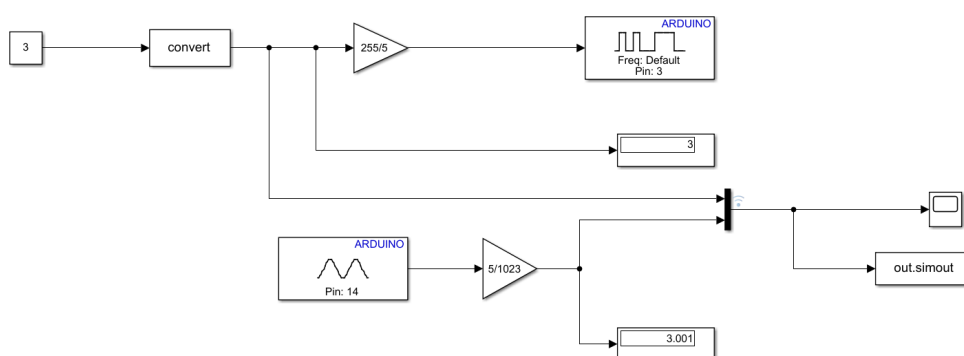


Figura 3 – Implementação do circuito no simulink

Após realizar a simulação no Simulink, obtivemos um gráfico que será utilizado como referência para determinar os pontos em cada método. Utilizaremos esse gráfico como base para a análise dos resultados em cada abordagem.

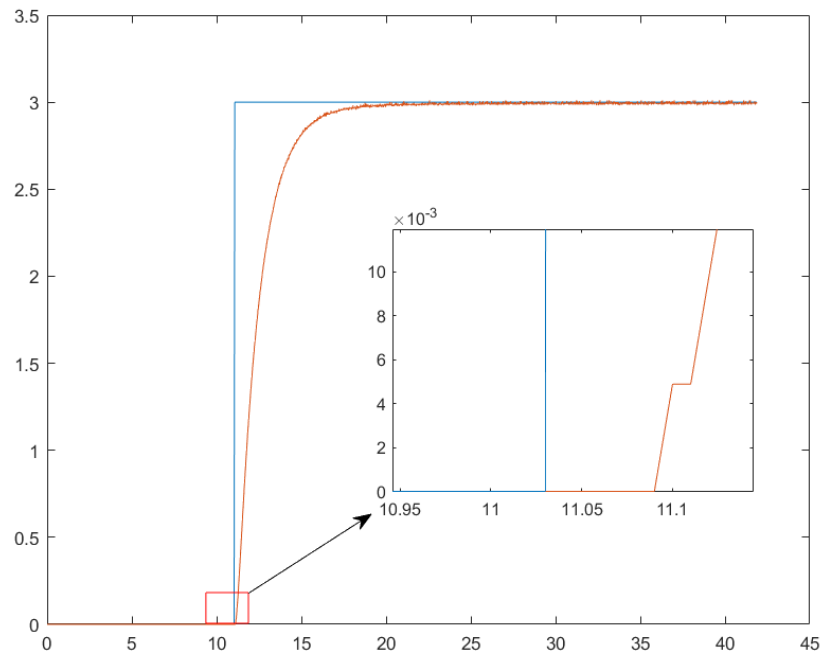


Figura 4 – Resposta ao degrau do experimento

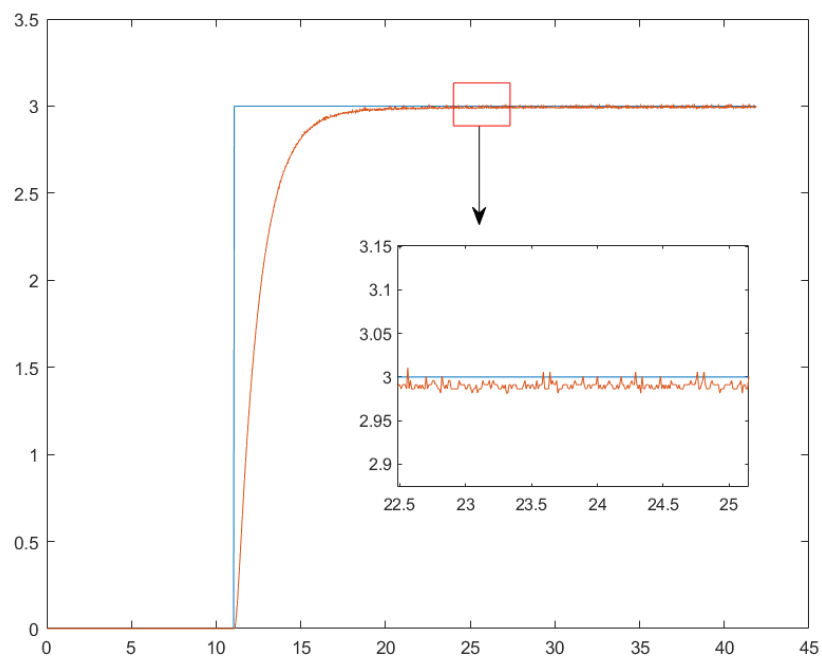


Figura 5 – Resposta ao degrau do experimento

1.1.1 Método Ziegler-Nichols

A fim de obter os dados desse método, é necessário traçar uma reta tangente à curva do capacitor. Os valores resultantes dessa análise são os seguintes:

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

O tempo de atraso:

$$T_o = T_2 - T_1 = 11,09 - 11,03 = 0,06$$

$$T_o = 0,06s$$

Constante de tempo

$$5\tau = 22,56 - 11,09$$

$$5\tau = 11,47$$

$$\tau = \frac{11,47}{5}$$

$$\tau = 2,294s$$

A equação de transferência do método é:

$$G_p(s) = \left(\frac{0,997}{2,294s + 1} \right) e^{-0,06s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Ziegler-Nichols.

1.1.2 Método Smith 1° ordem

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

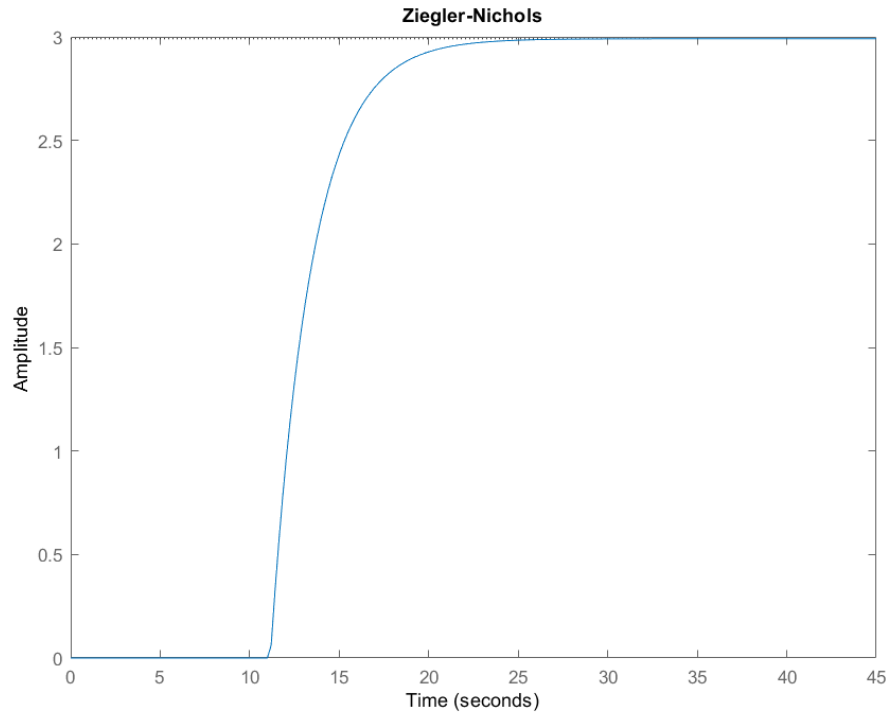


Figura 6 – Resposta ao degrau do método Ziegler-Nichols

Para os pontos:

$$T_1(28,3\%) = 28,3\% \times 2,991 = 0,846s$$

$$T_2(63,2\%) = 63,2\% \times 2,991 = 1,89s$$

A constante de tempo:

$$T = 1,5(T_2 - T_1) = 1,89 - 0,846 = 1,044s$$

O tempo de atraso é:

$$T_D = t_2 - T = 1,89 - 1,044 = 0,846s$$

A equação de transferência do método Smith 1° ordem é:

$$G_p(s) = \left(\frac{0,997}{1,044s + 1} \right) e^{-0,846s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Smith 1° ordem.

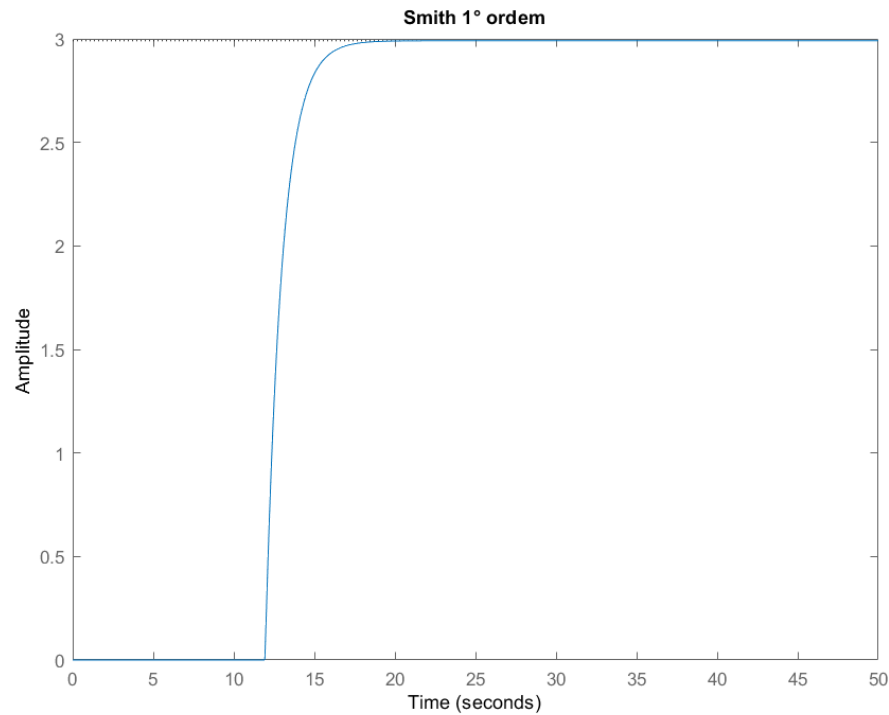


Figura 7 – Resposta ao degrau do método Smith 1º ordem

1.1.3 Método de Sundaresan-Krishnaswang

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

Para os pontos:

$$T_1(35,3\%) = 35,3\% \times 2,991 = 1,055s$$

$$T_2(85,3\%) = 85,3\% \times 2,991 = 2,551s$$

A constante de tempo:

$$T = 0,67(T_2 - T_1) = 2,551 - 1,055 = 1,002s$$

O tempo de atraso é:

$$T_D = (1,3 \times T_1) - (0,29 \times T_2)$$

$$T_D = (1,3 \times 1,055) - (0,29 \times 2,551)$$

$$T_D = 0,6317s$$

A equação de transferência do método Sundaresan-Krishnaswang é:

$$G_p(s) = \left(\frac{0,997}{1,002s + 1} \right) e^{-0,6317s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Sundaresan-Krishnaswang.

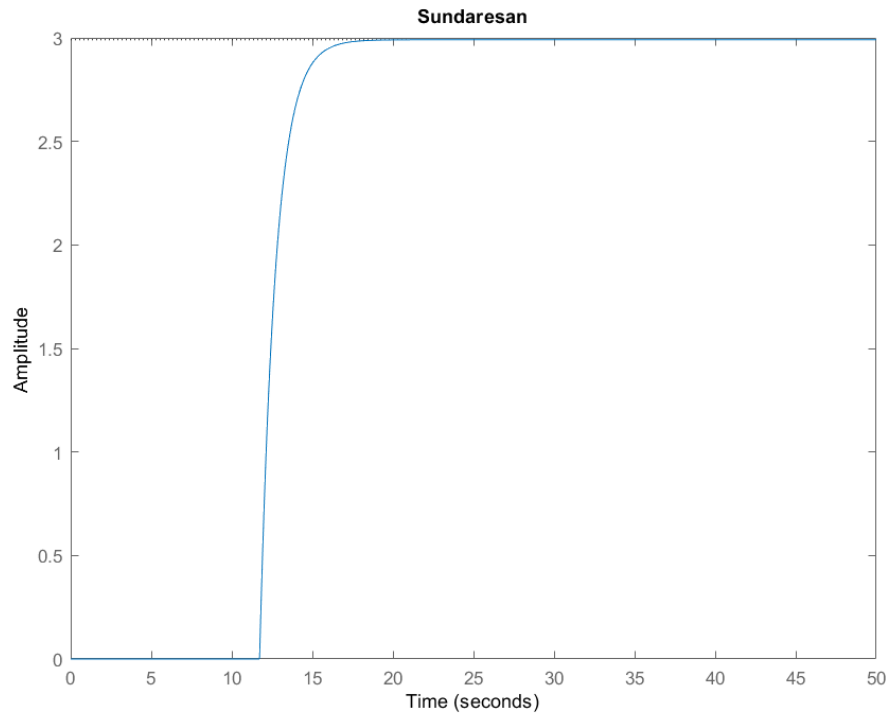


Figura 8 – Resposta ao degrau do método Sundaresan-Krishnaswang

1.1.4 Método de Broida

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

Para os pontos:

$$T_1(0,28\%) = 0,28\% \times 2,991 = 8,37 \times 10^{-3}s$$

$$T_2(0,4\%) = 0,4\% \times 2,991 = 0,0119s$$

A constante de tempo:

$$T = 5,5(T_2 - T_1) = 0,0119 - 8,37 \times 10^{-3} = 0,0194s$$

O tempo de atraso é:

$$T_D = (2,8 \times T_1) - (1,8 \times T_2)$$

$$T_D = (2,8 \times 8,37 \times 10^{-3}) - (1,8 \times 0,0119)$$

$$T_D = 2,016 \times 10^{-3}s$$

A equação de transferência do método Broida é:

$$G_p(s) = \left(\frac{0,997}{0,0194s + 1} \right) e^{-2,016 \times 10^{-3}s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Broida.

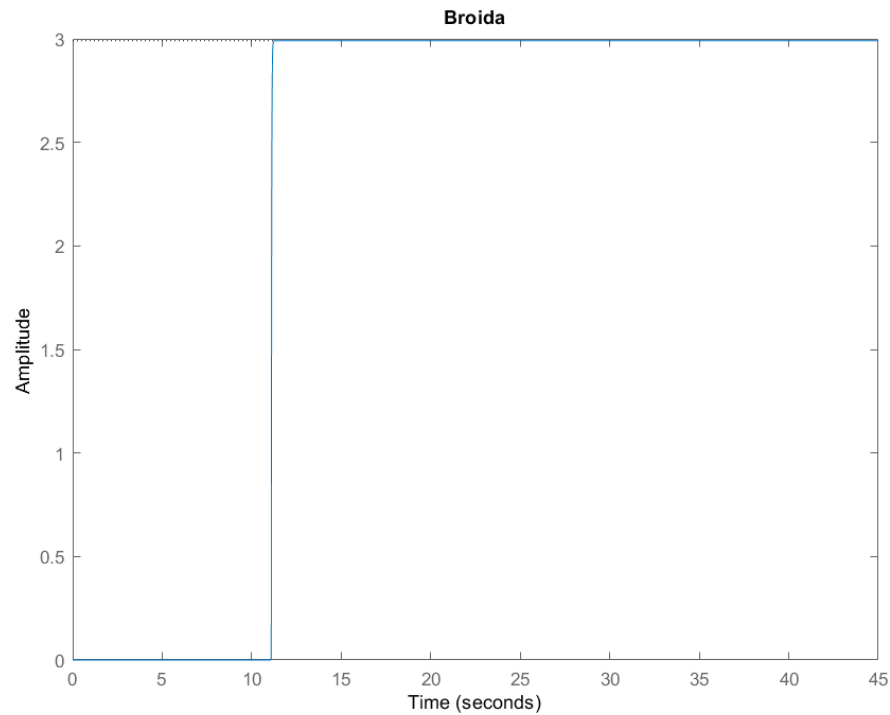


Figura 9 – Resposta ao degrau do método Broida

1.1.5 Método de Smith de 2º ordem

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

Para o método, encontramos os seguintes pontos:

$$T_{20\%} = 11,53s$$

$$T_{60\%} = 12,44s$$

$$\frac{T_{20\%}}{T_{60\%}} = \frac{11,53}{12,44} = 0,926s$$

Como o $\frac{T_{20\%}}{T_{60\%}} = 0,926$ não é possível realizar os cálculos pois esse valor está fora do intervalo do gráfico.

1.1.6 Método de Harriot

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

Para o método, encontramos os seguintes tempos:

Tempo para 73% da amplitude:

$$T_{73\%} = 12,96s$$

Tempo de início da curva:

$$T_o = 11,09s$$

Tempo para 33% da amplitude:

$$T_{33\%} = 11,77s$$

Tempo para 70% da amplitude:

$$T_{70\%} = 12,81s$$

Encontrando T_1 :

$$\begin{aligned} T_1 &= T_o + \frac{T_{73\%} - T_o}{2,6} \\ T_1 &= 11,09 + \frac{12,96 - 11,09}{2,6} \\ T_1 &= 11,80s \end{aligned}$$

Como Y_1 é o par da coordenada do gráfico do circuito do experimento:

$$Y_1 = 1,046$$

$$\frac{Y_1}{\infty} = \frac{1,046}{2,981} = 0,350$$

Com o valor de $\frac{Y_1}{\infty}$ e o gráfico de Harriot, encontramos o valor da fração:

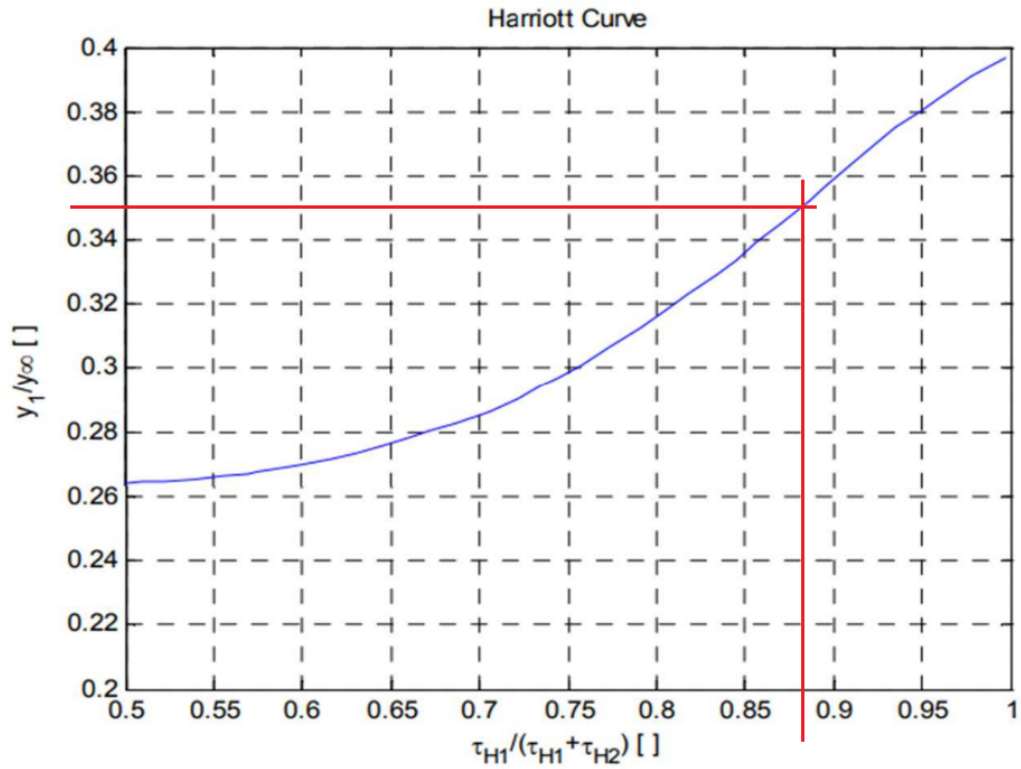


Figura 10 – Resposta ao degrau do método Broida

$$\frac{\tau_{H1}}{\tau_{H1} + \tau_{H2}} = 0,875$$

Calculando o τ_{H1} :

$$\tau_{H1} = \frac{\tau_{H1}}{\tau_{H1} + \tau_{H2}} \times \frac{12,96 - 11,09}{1,3}$$

$$\tau_{H1} = 0,875 \times \frac{12,96 - 11,09}{1,3}$$

$$\tau_{H1} = 1,25$$

Calculando o τ_{H2} :

$$\left[1 - \frac{\tau_{H1}}{\tau_{H1} - \tau_{H2}} \right] \times \frac{T_{73\%} - T_o}{1,3}$$

$$\tau_{H2} = (1 - 0,875) \times \left(\frac{12,96 - 11,09}{1,3} \right)$$

$$\tau_{H2} = 0,179$$

O tempo de atraso:

$$T_o = 1,937 \times T_{73\%} - 0,37 \times T_{70\%}$$

$$T_o = 1,937 \times 11,77\% - 0,37 \times 12,81$$

$$T_o = 18,05s$$

A equação de transferência do método Harriot é:

$$G_p(s) = \left(\frac{0,997}{(1 + 1,25) \times (1 + 0,179)} \right) e^{-18,05s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Harriot.

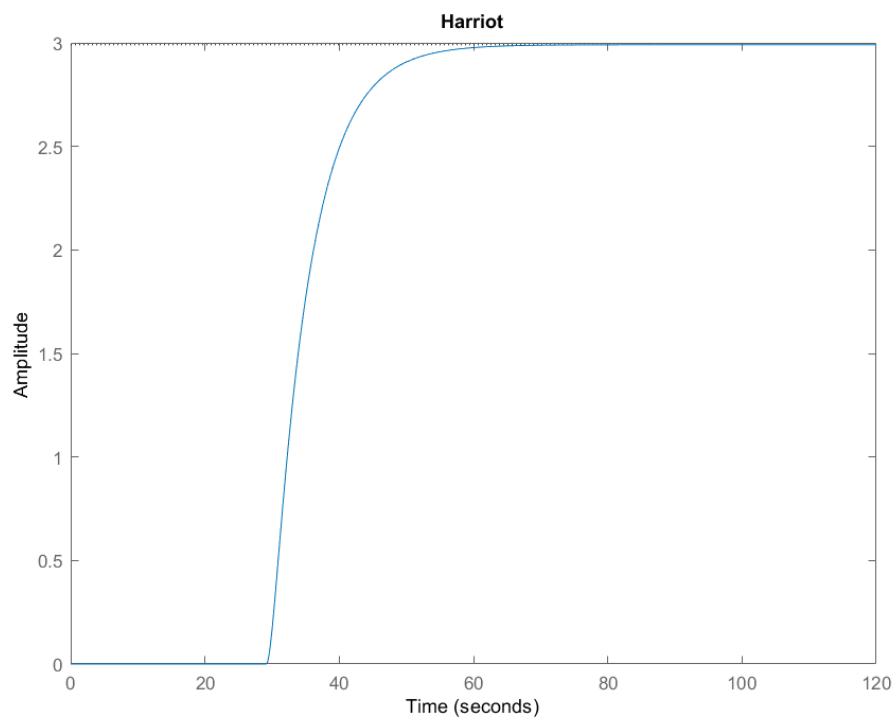


Figura 11 – Resposta ao degrau do método Harriot

1.1.7 Método Mollenkamp

O ganho K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,991 - 0}{3 - 0} = 0,997$$

$$K = 0,997$$

Para os pontos:

$$T_{15\%} = 11,44s$$

$$T_{45\%} = 12,02s$$

$$T_{75\%} = 13,08s$$

$$X = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} = \frac{12,02 - 11,44}{13,08 - 11,44} = 0,353$$

o valor de ζ é:

$$\begin{aligned}\zeta &= \frac{0,0805 - 5,547(0,475 - X)^2}{X - 0,356} \\ \zeta &= \frac{0,0805 - 5,547(0,475 - 0,353)^2}{0,353 - 0,356} \\ \zeta &= 0,687\end{aligned}$$

o valor de F_2 :

$$\begin{aligned}F_2(\zeta) &= (0,708)(2,811)^\zeta \\ F_2(\zeta) &= (0,708)(2,811)^{0,687} \\ F_2(\zeta) &= 1,440\end{aligned}$$

A frequência natural não amortecida ω_n :

$$\begin{aligned}\omega_n &= \frac{F_2(\zeta)}{T_3 - T_1} \\ \omega_n &= \frac{1,440}{13,08 - 11,44} \\ \omega_n &= 0,87\end{aligned}$$

O valor de $F_3(\zeta)$:

$$F_3(\zeta) = 0,922(1,66)^\zeta$$

$$F_3(\zeta) = 0,922(1,66)^{0,687}$$

$$F_3(\zeta) = 1,3$$

O tempo de atraso:

$$T_D = T_2 - \frac{F_3(z\zeta)}{\omega_n}$$

$$T_D = 12,02 - \frac{1,3}{0,87}$$

$$T_D = 10,52s$$

A equação de transferência do método Mollenkamp é:

$$G_p(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-T_D s}$$

$$G_p(s) = \frac{0,997 \times 0,87^2}{s^2 + 2 \times 0,687 \times 0,87s + 0,87^2} e^{-10,52s}$$

$$G_p(s) = \frac{0,754}{s^2 + 1,19s + 0,756} e^{-10,52s}$$

A figura a seguir ilustra a representação gráfica da função de transferência do método Mollenkamp.

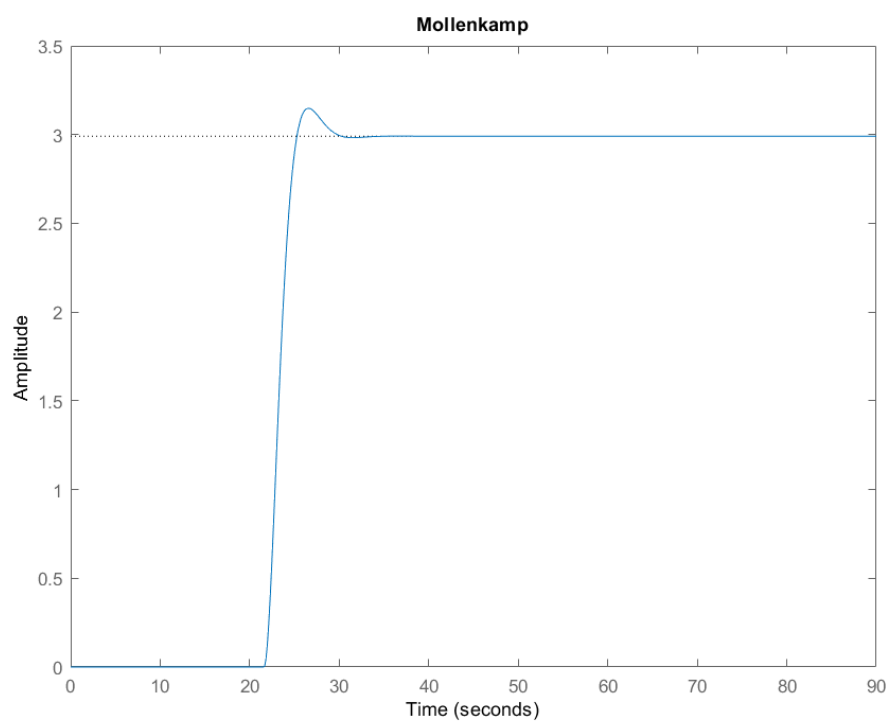


Figura 12 – Resposta ao degrau do método Mollenkamp

A figura abaixo mostra a comparação entre todos os métodos.

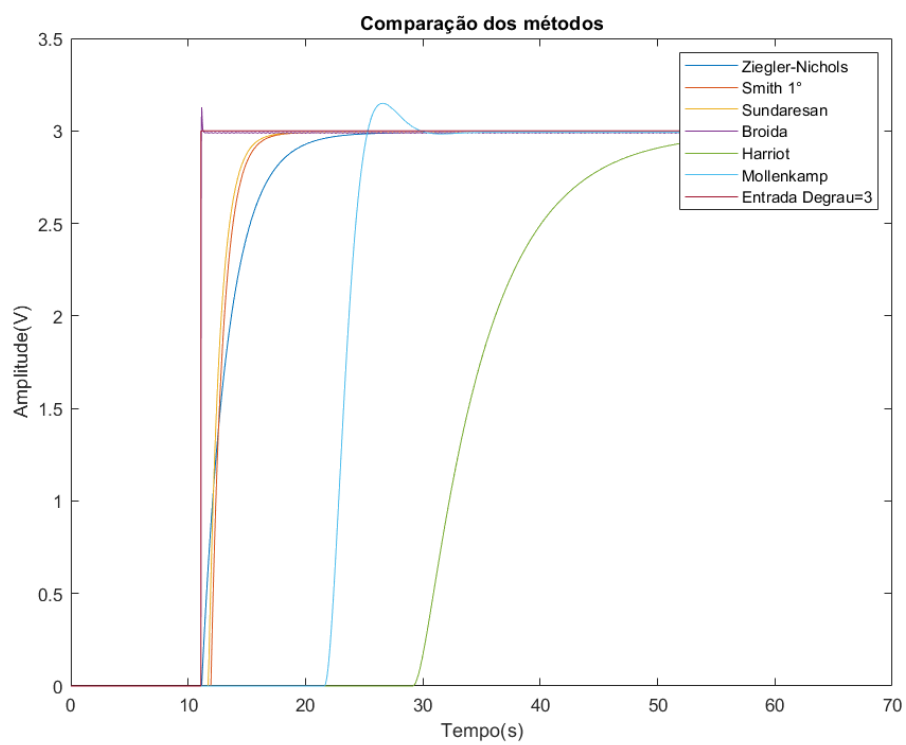


Figura 13 – Todos os métodos

1.1.8 Validando os métodos utilizando com índices estatísticos

A seguir, apresentamos a figura que ilustra a simulação realizada no Simulink para obter os índices estatísticos.

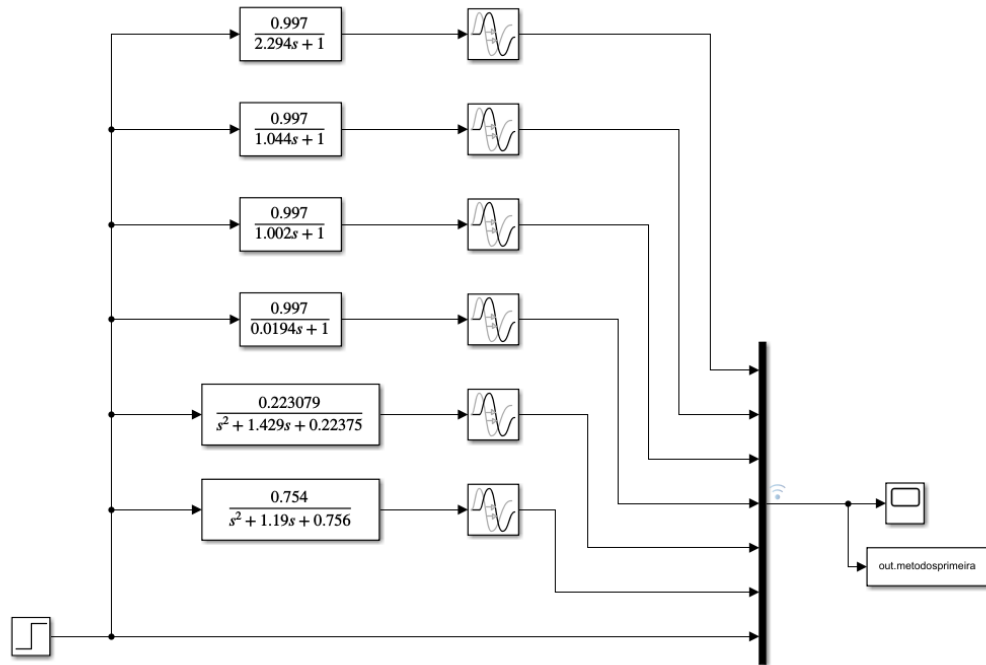


Figura 14 – Simulação feita no Simulink para a obtenção dos índices estatísticos

Após realizar as análises dos métodos, é possível realizar a validação dos mesmos. A validação é feita através do cálculo de um índice, no qual um valor mais próximo de 100 indica que os dados estimados explicam a maior parte da variabilidade dos dados medidos.

Em outras palavras, quando o valor do índice se aproxima de 100, significa que o método utilizado para estimar os dados consegue explicar uma grande parte da variação presente nos dados reais que foram medidos. Isso indica que o método é mais preciso e confiável na sua capacidade de representar e prever os valores corretos.

Essa validação é importante para verificar a eficácia dos métodos utilizados e a qualidade das estimativas obtidas. Quanto mais próximo de 100 o índice estiver, maior é a confiança de que as estimativas estão próximas aos valores reais e a variabilidade dos dados medidos está sendo adequadamente explicada pelo método analisado.

Validação dos métodos		
Método	NRMSE	r^2
Ziegler Nichols	99,1107	95,3246
Smith 1º ordem	100	100
Sundaresan Krishnaswang	99,5064	98,8591
Broida	95,9288	28,7062
Harriot	56,6965	-750,9628
Mollenkamp	80,41	-313,3565

Tabela 1 – Validação dos métodos.

Podemos ver que no método de validação NRMSE e no método r^2 o método Smith de 1º ordem é o melhor. .

2 Item 2

Abaixo, temos a figura de comparação do método de Smith de 1º ordem e a curva feita experimentalmente.

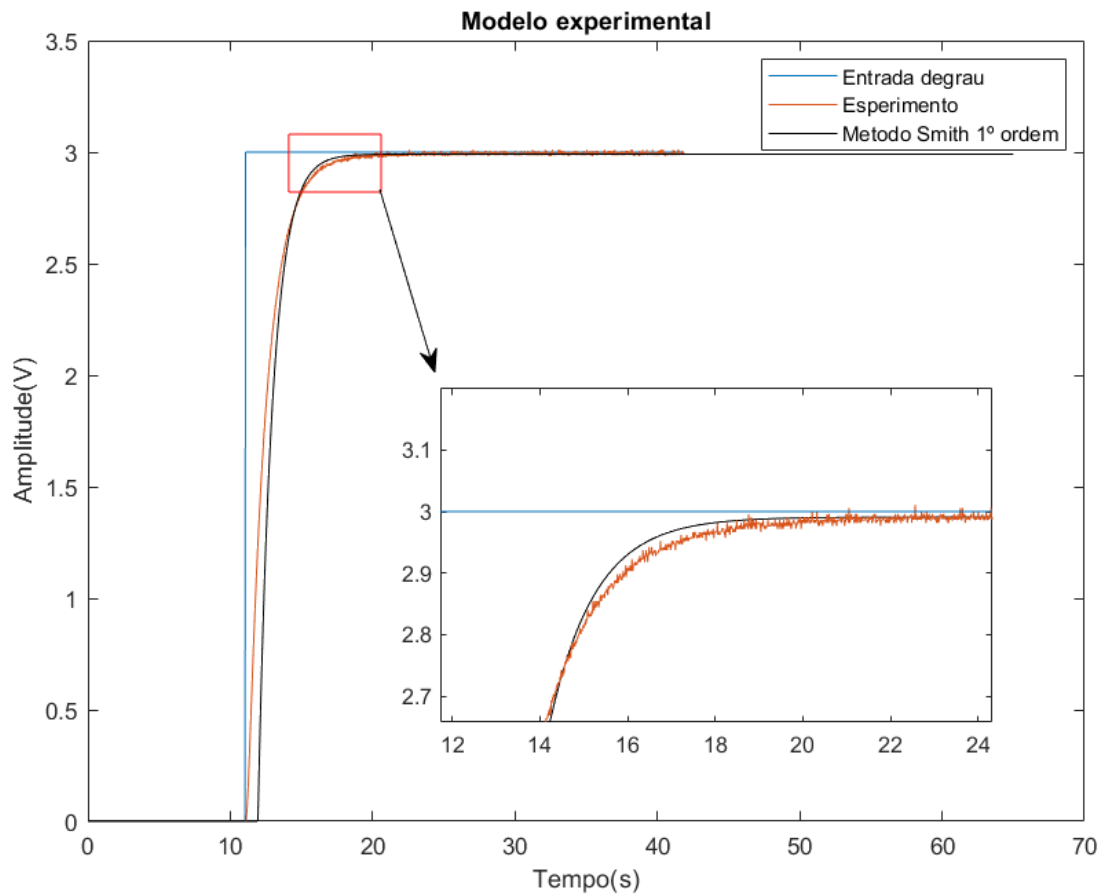


Figura 15 – Comparação do experimento com método de smith 1º ordem

No gráfico acima, pode-se notar que as curvas são muito semelhantes. Essa conclusão é apoiada pelos índices estatísticos calculados. Isso sugere que os métodos ou modelos utilizados para gerar essas curvas produzem resultados altamente concordantes, validando sua similaridade.

3 Item 3

3. Projetem um controlador PI e PID (na ação derivativa, comparem com e sem o uso do filtro), utilizando a arquitetura ideal e cada método apresentado (ver item 8.2a no Classroom). Utilizem o modelo estimado do item 1 e o modelo fenomenológico (ver projeto 1) para a sintonia dos parâmetros do controlador PID. Avaliem os controladores com índices qualitativos (IAE e ITAE).

3.1 Método Ziegler-Nichols

Os valores para o cálculo do método são:

$$K = 0,997$$

$$T_1 = 1,044s$$

$$D = 0,846s$$

Calculando o parâmetro do controlador proporcional P Ziegler-Nichols:

$$K_p = \frac{T_1}{K \times D} = \frac{1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_p = 1,237$$

$$C(s) = 1,237 \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador PI Ziegler-Nichols:

$$K_p = \frac{0,9 \times T_1}{K \times D} = \frac{0,9 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_p = 1,113$$

$$T_i = 3,3 \times T_1 = 3,3 \times 1,044$$

$$T_1 = 3,4452s$$

$$C(s) = 1,113 \left(\frac{1}{3,4452} \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador *PID* Ziegler-Nichols:

$$K_p = \frac{1,2 \times T_1}{K \times D} = \frac{1,2 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_p = 1,485$$

$$T_i = 2 \times D = 2 \times 0,846$$

$$T_i = 1,692s$$

$$T_D = \frac{D}{2} = \frac{0,846}{2}$$

$$T_D = 0,423s$$

$$C(s) = 1,485 \left(1 + \frac{1}{1,692s} + 0,423s \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

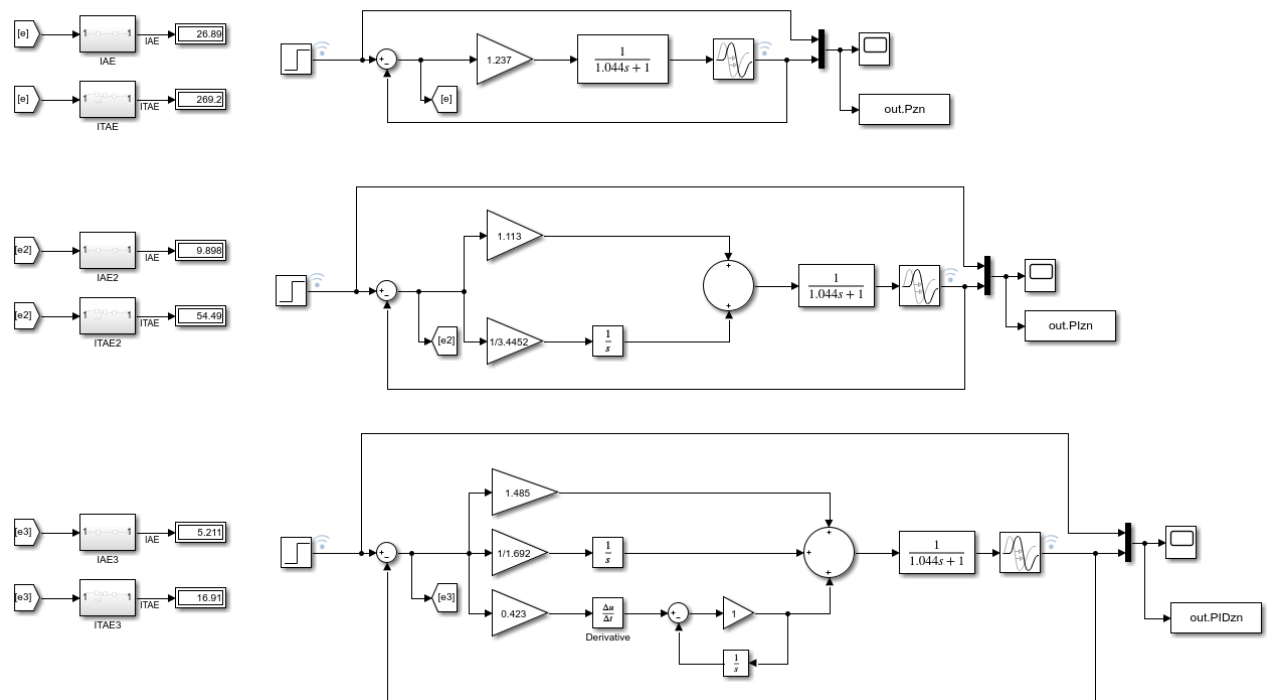


Figura 16 – Simulação dos 3 controladores *PID* no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).

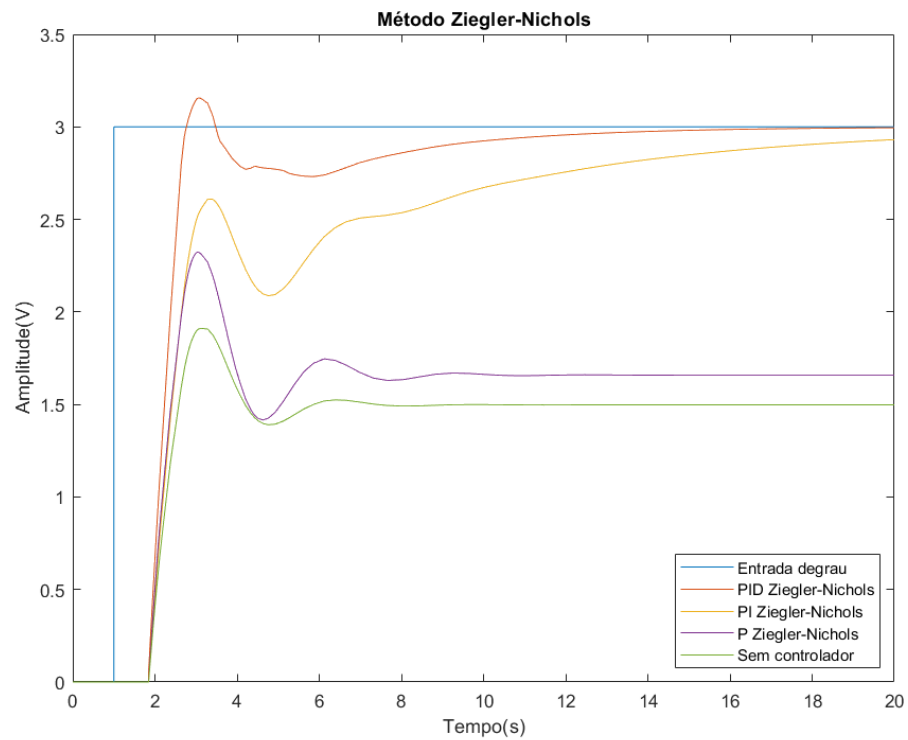


Figura 17 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador

3.2 Método CHR

Os valores para o calculo do método são:

$$K = 0,997$$

$$T_1 = 1,044s$$

$$D = 0,846s$$

Calculando o parâmetro do controlador proporcional P CHR:

$$K_P = \frac{0,3 \times T}{K \times 0,846} = \frac{0,3 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 0,371$$

$$C(s) = 0,371 \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando o parâmetro do controlador proporcional PI CHR:

$$K_P = \frac{0,35 \times T}{K \times L} = \frac{0,35 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 0,433$$

$$T_i = 1,16 \times T = 1,16 \times 1,044$$

$$T_i = 1,211s$$

$$C(s) = 0,433 \left(1 + \frac{1}{1,211s} \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador PID CHR :

$$K_P = \frac{0,6 \times T}{K \times L} = \frac{0,6 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 0,742$$

$$T_i = T = 1,044s$$

$$T_i = 1,044s$$

$$t_D = \frac{L}{2} = \frac{0,846}{2}$$

$$T_D = 0,423s$$

$$C(s) = 0,742 \left(\frac{1}{1,044s} + 0,423s \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

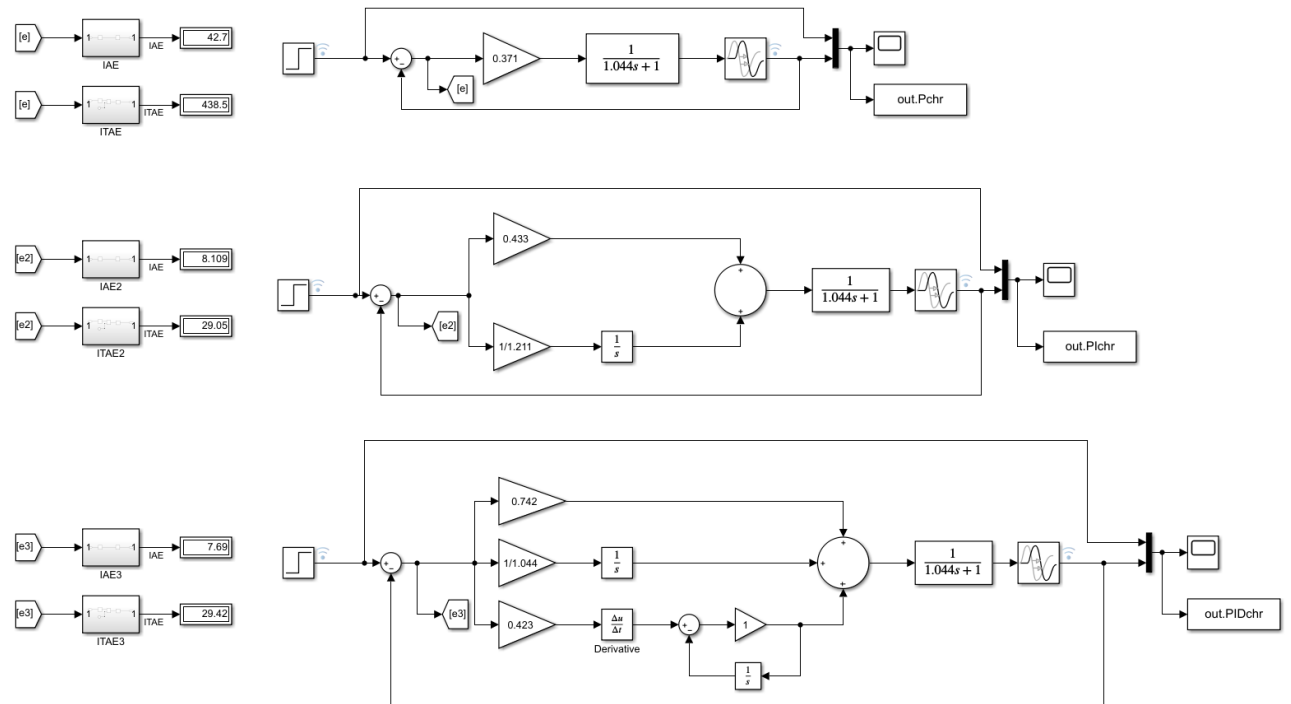


Figura 18 – Simulação dos 3 controladores *PID* CHR no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).

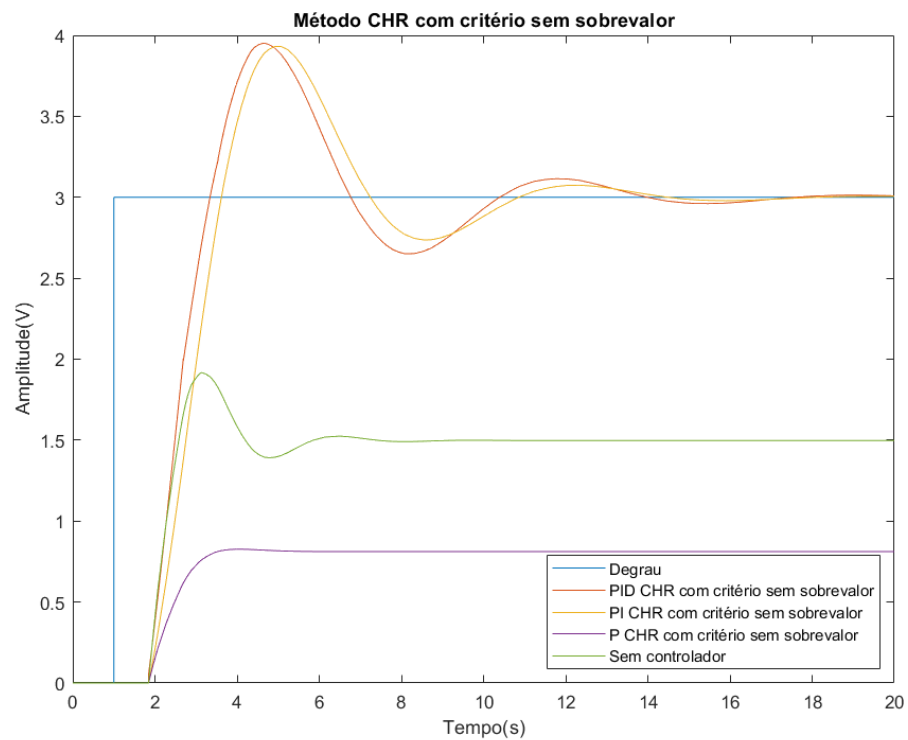


Figura 19 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador CHR

3.3 Método CHR com critério de 20% de overshoot

Os valores para o calculo do método são:

$$K = 0,997$$

$$T_1 = 1,044s$$

$$D = 0,846s$$

Calculando os parâmetros do controlador P CHR com critério de 20% de overshoot :

$$K_P = \frac{0,7 \times T}{K \times L} = \frac{0,7 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 0,866$$

$$C(s) = 0,866 \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador PI CHR com critério de 20% de overshoot :

$$K_P = \frac{0,6 \times T}{K \times L} = \frac{0,6 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 0,742$$

$$T_i = L = 0,846$$

$$T_i = 0,846s$$

$$C(s) = 0,742 \left(1 + \frac{1}{0,846s} \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador PID CHR com critério de 20% de overshoot :

$$K_p = \frac{0,95 \times T}{K \times L} = \frac{0,95 \times 1,044}{0,997 \times 0,846}$$

$$K_P = 1,175$$

$$T_i = 1,357 \times T = 1,357 \times 1,044$$

$$T_i = 1,416s$$

$$T_D = 0,473 \times L = 0,473 \times 0,846$$

$$T_D = 0,4s$$

$$C(s) = 1,175 \left(1 + \frac{1}{1,416s} + 0,4s \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

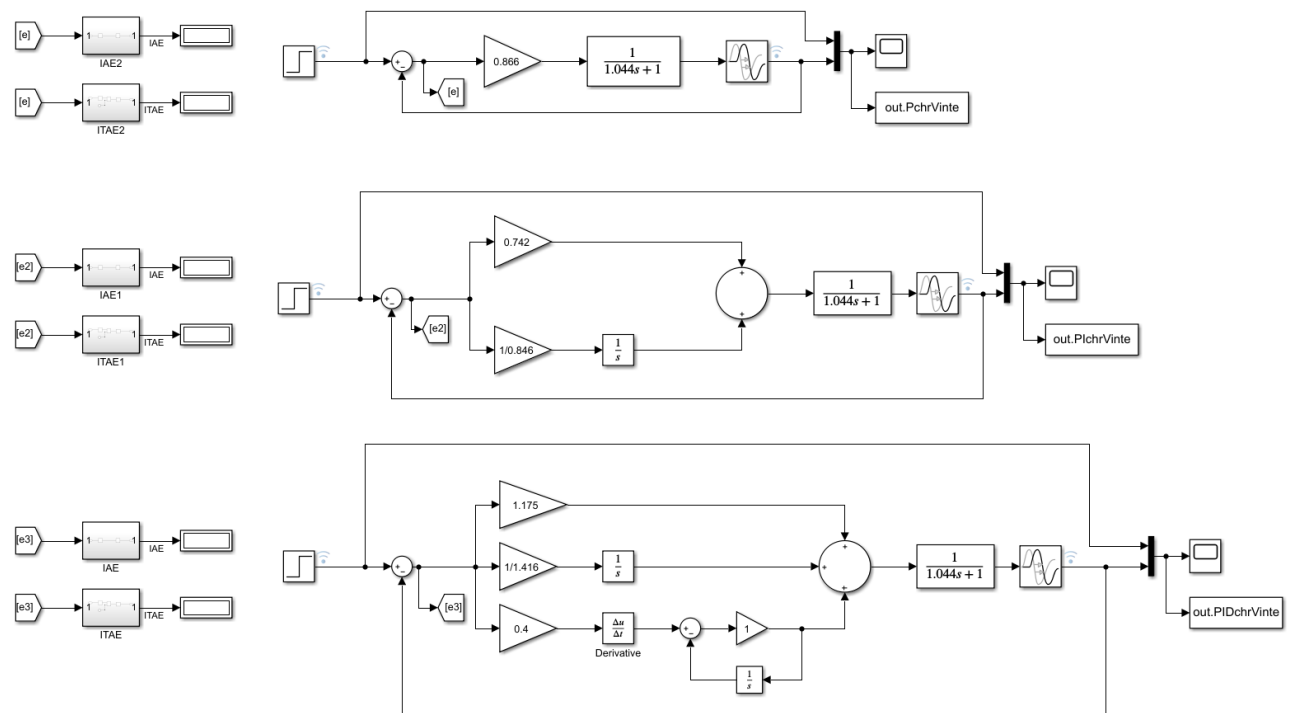


Figura 20 – Simulação dos 3 controladores *PID* CHR com critério de 20% de overshoot no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).

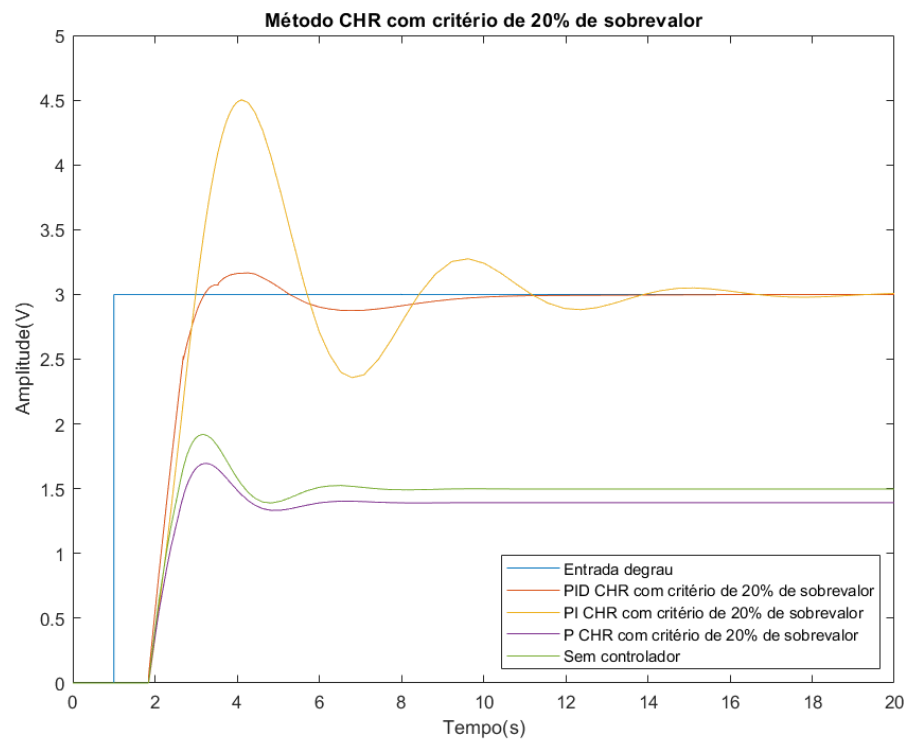


Figura 21 – Comparação entre os 3 métodos e o sistema sem controlador CHR com critério de 20% de overshoot

3.4 Método IMC

Os valores para o calculo do método são:

$$K = 0,997$$

$$\tau = 1,044s$$

$$\theta = 0,846s$$

Calculando os parâmetros do controlador PI IMC:

$$\frac{\lambda}{\theta} > 1,7$$

$$\frac{\lambda}{0,846} > 1,7$$

$$\lambda > 1,4382$$

Agora podemos Calcular $K_p e T_i$:

$$K_p = \frac{2\tau + \theta}{K \times 2\lambda} = \frac{2 \times 1,044 + 0,846}{0,997 \times 2 \times 1,4382}$$

$$K_p = 1,023$$

$$T_i = \tau + \frac{\theta}{2} = 1,044 + \frac{0,846}{2}$$

$$T_i = 1,467s$$

$$C(s) = 1,023 \left(1 + \frac{1}{1,467s} \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

Calculando os parâmetros do controlador PID IMC:

$$\frac{\lambda}{\theta} > 0,8$$

$$\frac{\lambda}{0,846} > 0,8$$

$$\lambda > 0,6768$$

logo:

$$K_p = \frac{2\tau + \theta}{K \times (2\lambda + \theta)} = \frac{2 \times 1,044 + 0,846}{0,997 \times (2 \times 0,6768 + 0,846)}$$

$$K_p = 1,337$$

$$T_i = \tau + \frac{\theta}{2} = 1,044 + \frac{0,846}{2}$$

$$T_i = 1,467s$$

$$T_D = \frac{\tau \times \theta}{2\tau + \theta} = \frac{1,044 \times 0,846}{2 \times 1,044 + 0,846}$$

$$T_D = 0,301s$$

$$C(s) = 1,337 \left(1 + \frac{1}{1,467s} + 0,301s \right) \left(\frac{e^{-0,846s}}{1,044s + 1} \right)$$

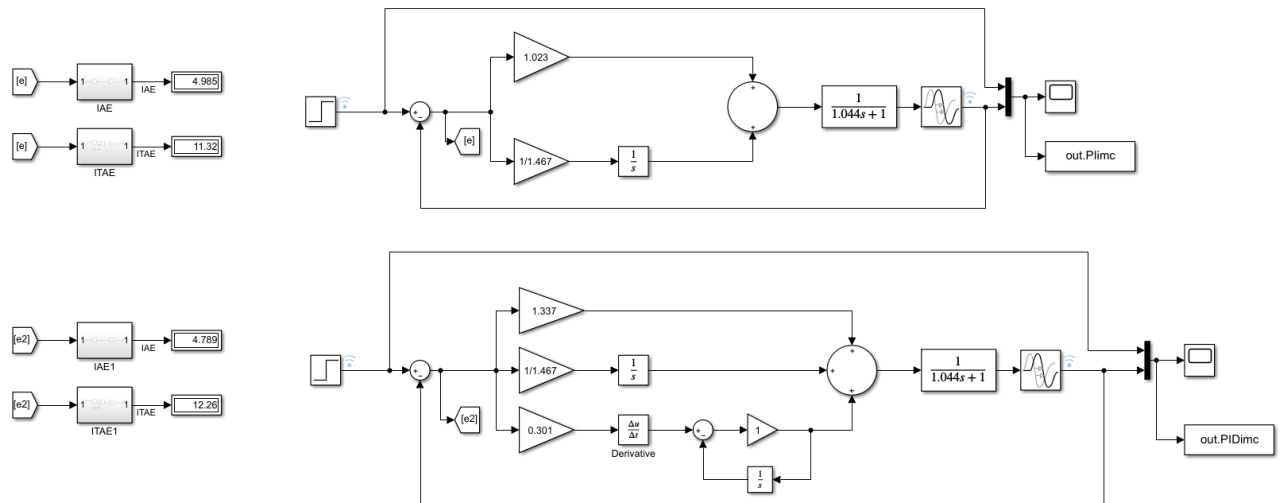


Figura 22 – Simulação dos 3 controladores *PID* IMC no simulink e índices qualitativos (IAE e ITAE).

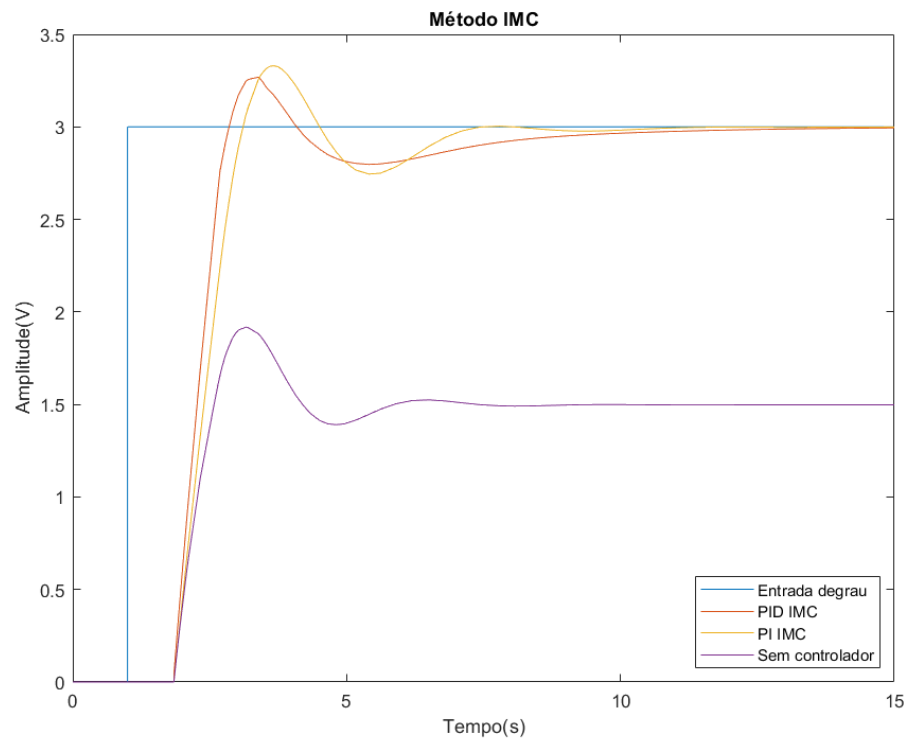


Figura 23 – Comparação entre os 3 métodos IMC e o sistema sem controlador

3.5 Avaliação dos controladores com índices qualitativos IAE e ITAE.

Ziegler-Nichols	IAE	ITAE
P	26,89	269,2
PI	9,898	54,49
PID	5,211	16,91

Tabela 2 – Ziegler-Nichols IAE e ITAE.

CHR	IAE	ITAE
P	42,7	438,5
PI	8,109	29,05
PID	7,69	29,42

Tabela 3 – CHR IAE e ITAE.

CHR com 20%	IAE	ITAE
P	31,96	322,7
PI	8,75	35,03
PID	4,693	11,15

Tabela 4 – CHR com 20% de overshoot IAE e ITAE.

IMC	IAE	ITAE
P	-	-
PI	4,985	11,32
PID	4,789	12,26

Tabela 5 – IMC IAE e ITAE.

Quanto menor o valor do IAE, melhor é o desempenho do sistema de controle, indicando um erro geral mínimo.

O ITAE considera tanto a magnitude quanto a duração dos erros, dando mais peso aos erros que ocorrem por períodos mais longos. Similarmente ao IAE, um valor menor do ITAE indica um desempenho mais eficiente do sistema de controle. No entanto, é importante considerar que a escolha do índice de avaliação depende do sistema em estudo e dos objetivos específicos de controle.

4 Item 4

4. Implementem experimentalmente o projeto de compensadores por avanço de fase, atraso de fase, e avanço e atraso de fase, desenvolvidos no projeto 3. Realizem a comparação entre a simulação e o experimento.

4.1 Atraso de fase

Neste passo, empregamos a função de transferência do compensador com atraso de fase desenvolvido no projeto 3. Inserimos a função de transferência no pino 3 (que funciona como a entrada de energia do circuito) e fechamos o loop tomando a saída do pino A0 (que representa a tensão no capacitor e a saída do nosso circuito). Essa configuração pode ser visualizada na figura a seguir.

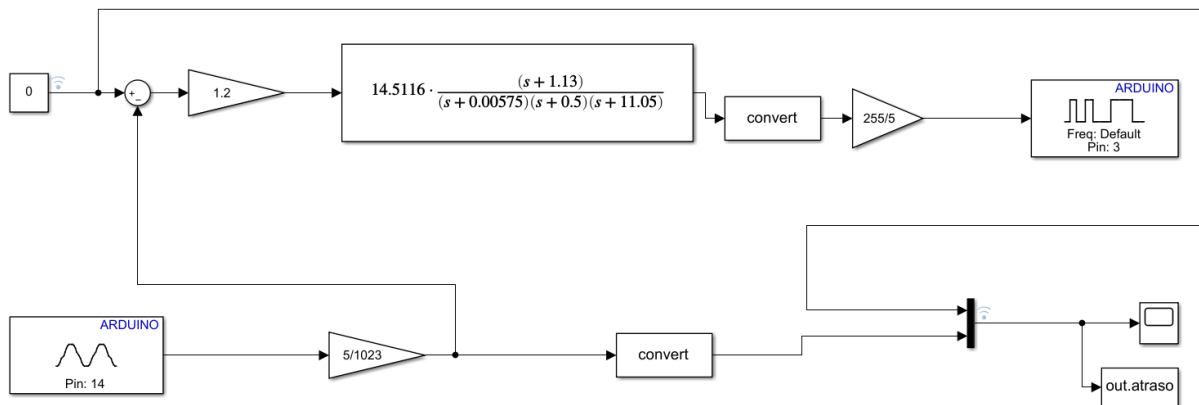


Figura 24 – Compensador por atraso no simulink.

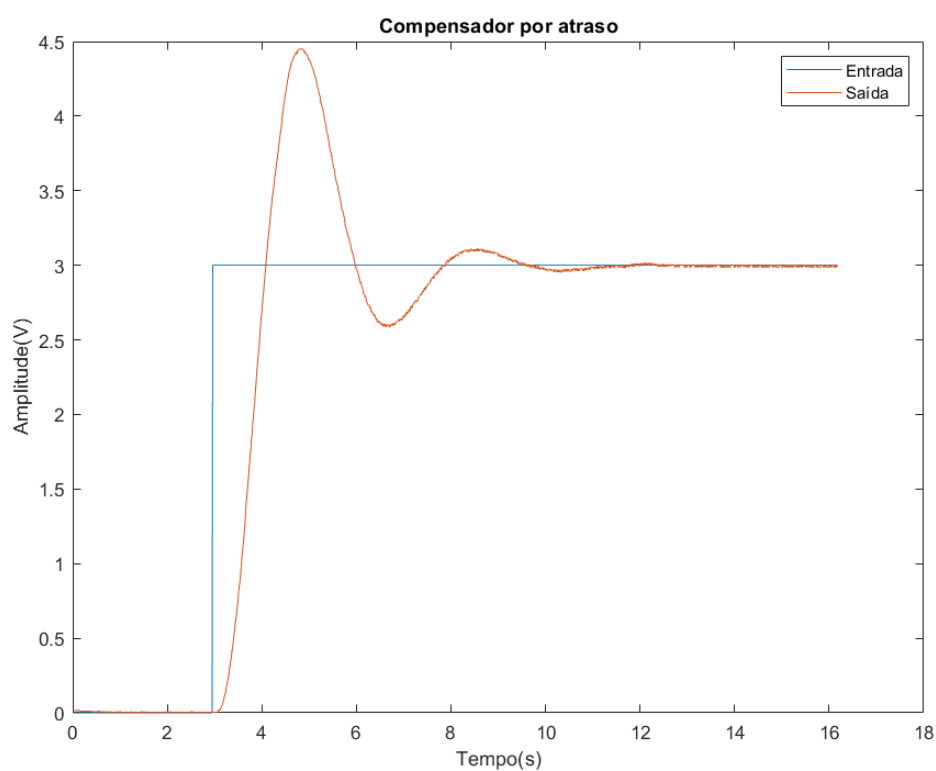


Figura 25 – Compensador por atraso do experimento

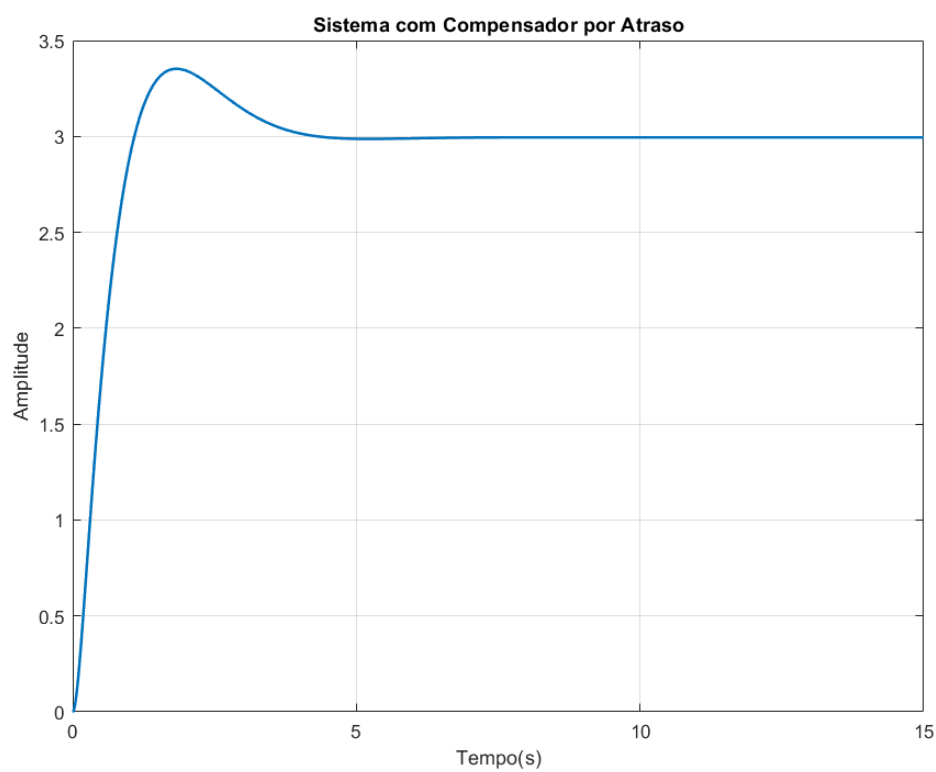


Figura 26 – Simulação do compensador por atraso do projeto 3.

4.2 Avanço de fase

Neste passo, empregamos a função de transferência do compensador com avanço de fase desenvolvido no projeto 3. Inserimos a função de transferência no pino 3 (que funciona como a entrada de energia do circuito) e fechamos o loop tomando a saída do pino A0 (que representa a tensão no capacitor e a saída do nosso circuito). Essa configuração pode ser visualizada na figura a seguir.

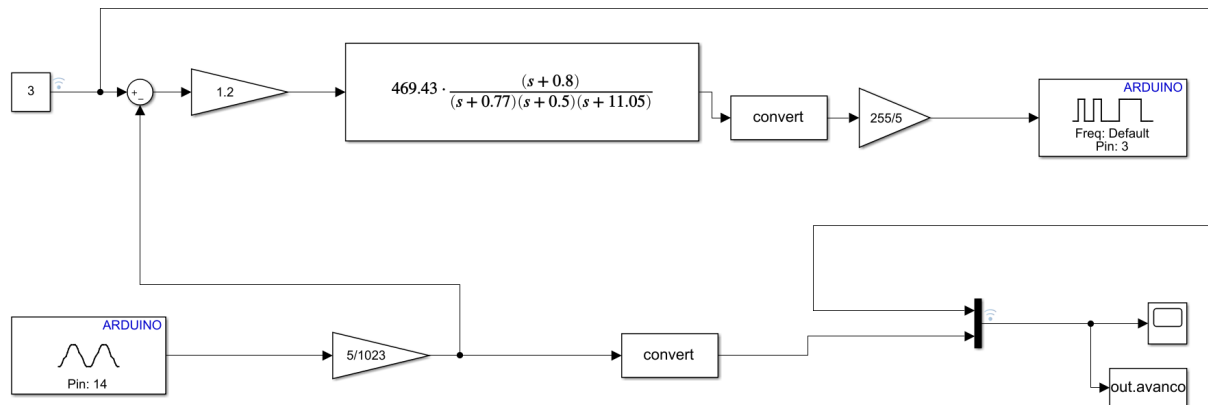


Figura 27 – Compensador por avanço no simulink.

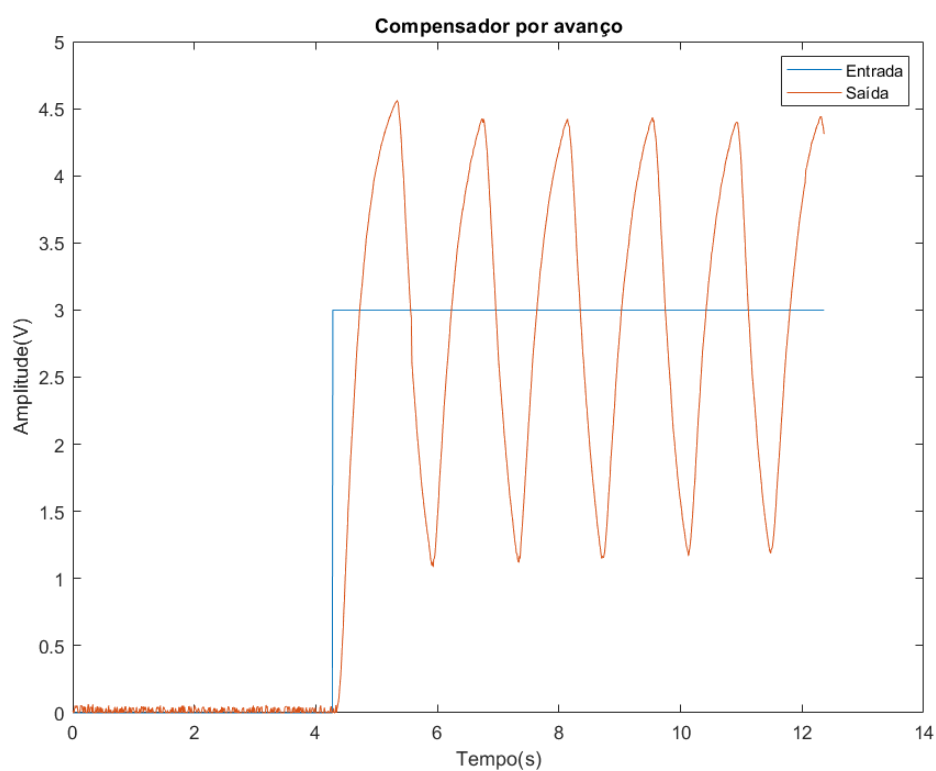


Figura 28 – Compensador por avanço do experimento

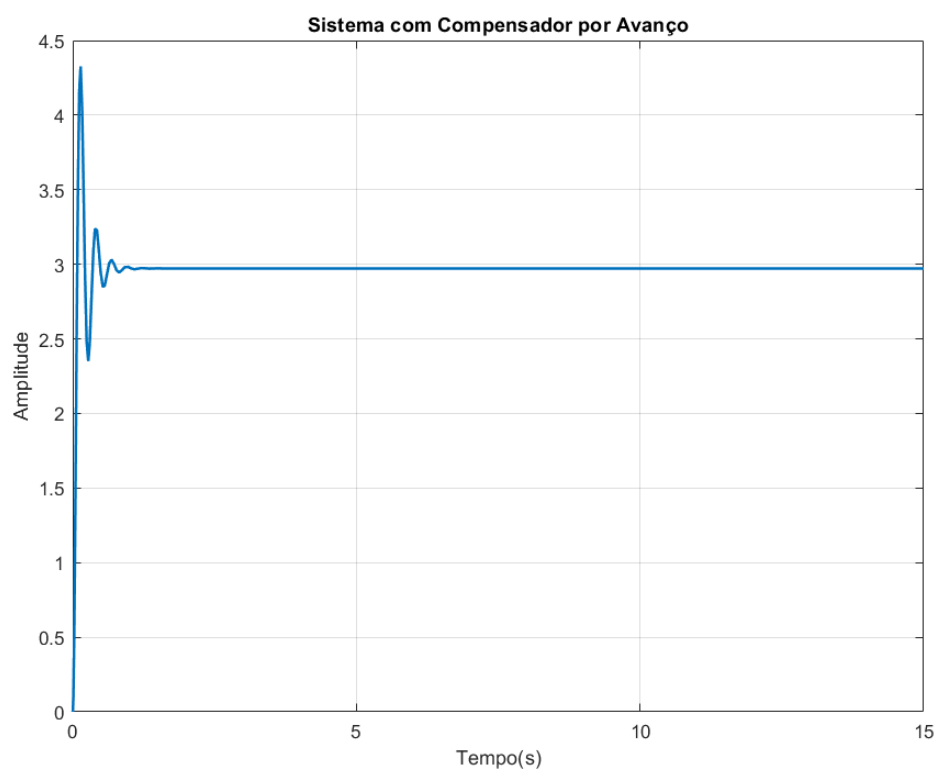


Figura 29 – Simulação do compensador por avanço do projeto 3.

4.3 Avanço e atraso de fase

Neste passo, empregamos a função de transferência do compensador com Avanço e atraso de fase desenvolvido no projeto 3. Inserimos a função de transferência no pino 3 (que funciona como a entrada de energia do circuito) e fechamos o loop tomando a saída do pino A0 (que representa a tensão no capacitor e a saída do nosso circuito). Essa configuração pode ser visualizada na figura a seguir.

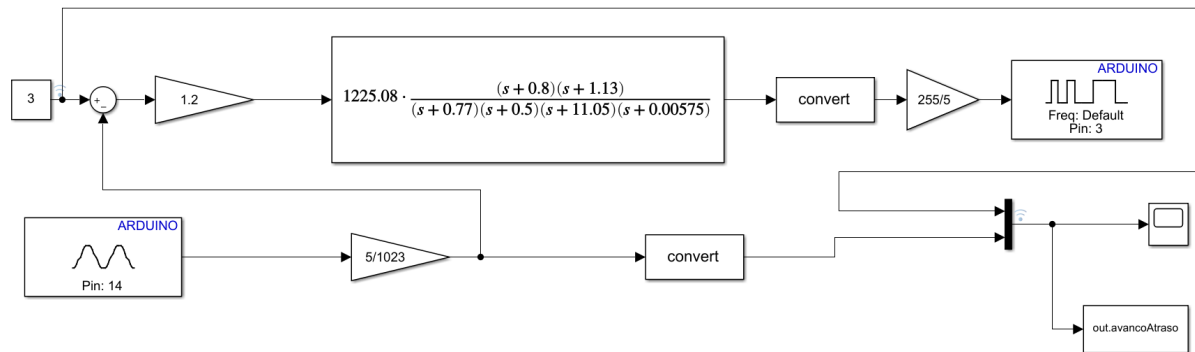


Figura 30 – Compensador por avanço e atraso no simulink.

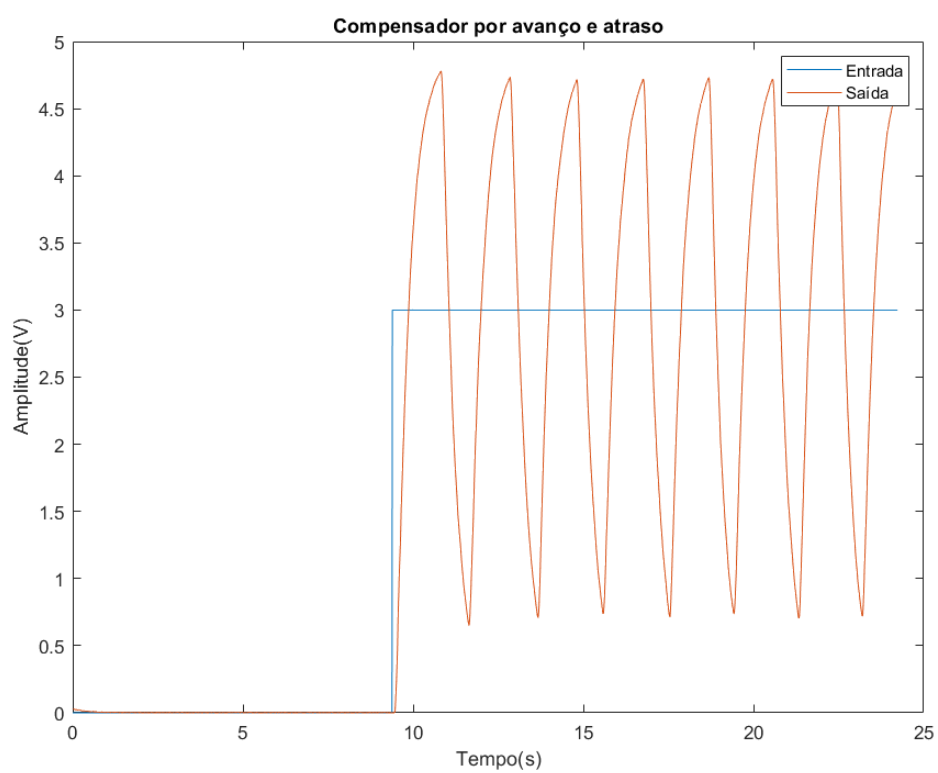


Figura 31 – Compensador por avanço e atraso do experimento

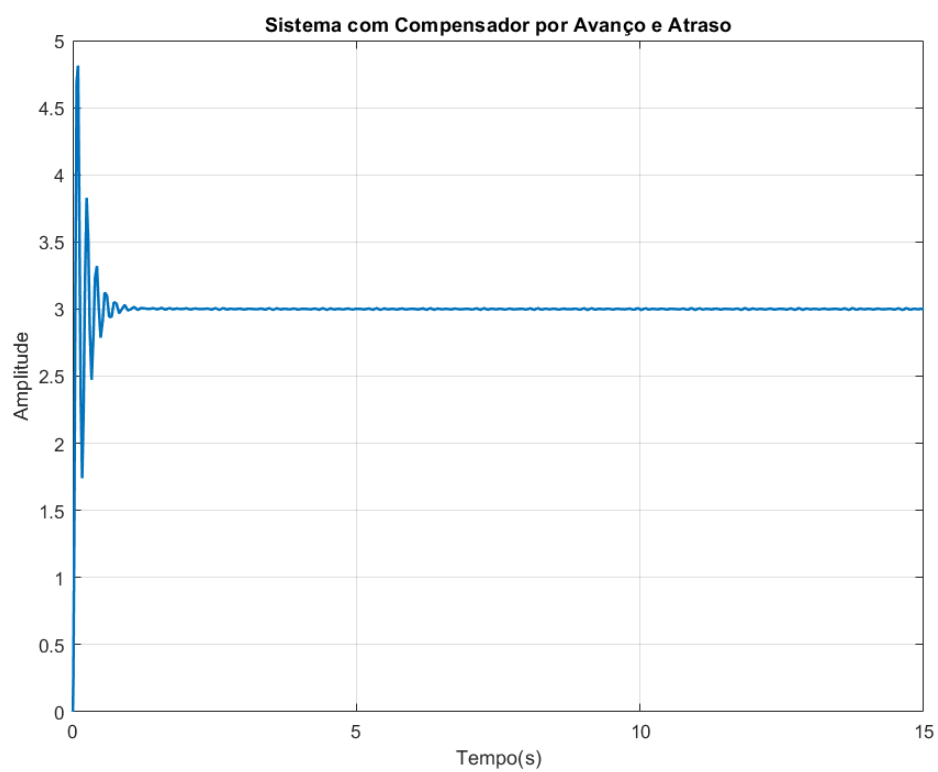


Figura 32 – Simulação do compensador por avanço e atraso do projeto 3.

5 Considerações finais

Diante dos resultados obtidos na simulação, pode-se afirmar que o programa MATLAB gerou quase os mesmos valores da parte analítica do projeto.