

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

Projeto 2 – Sistemas Representados por Variáveis de Estado

Engenharia Eletrônica
Aluno: Jhonatan de Freitas Lang
Disciplina: Sistemas de Controle 2
Professor: Flávio Bardemaker Batista

Florianópolis, Abril de 2021

Sumário

1. Objetivos.....	3
2. Análise da planta	3
3. Parâmetros desejados.....	5
4. Projeto do controlador por alocação de polos	6
5. Projeto do observador de ordem plena	8
6. Simulação do sistema completo com controlador, observador e planta	9
7. Fluxograma implementação em um microcontrolador.....	11
8. Simulação no PSIM	12
9. Conclusão.....	14
10. Referências.....	14

1. Objetivos

- Aplicar conceitos de sistemas de controle e controle digital, para o projeto por alocação de polos e observadores;
- Analisar a planta do sistema analógico proposto no arquivo “**Especificação do projeto 2.pdf**” disponível no sigaa durante a disciplina SCT22108 - SISTEMAS DE CONTROLE II (2020 .2 - T01), encontrando seu modelo representado por espaço de estados, seus polos significativos e visualizando a resposta ao degrau;
- Elaborar o projeto de um controlador digital por alocação de polos seguindo os requisitos de projeto;
- Elaborar o projeto de um observador de estados de ordem plena, visualizando o comportamento das variáveis de estados originais e as variáveis de estado observadas;
- Simular e analisar o resultado do sistema composto pela planta, controlador e observador de estados;

2. Análise da planta

Para o projeto foi fornecido um circuito com a topologia da **Figura 1 - Planta Analógica**, este é um filtro passa baixa de segunda ordem com a topologia Sallen-key.

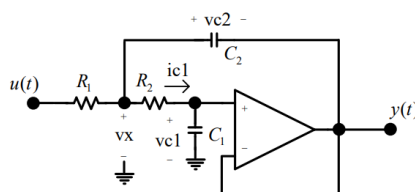


Figura 1 – Sistema analógico

Onde:

$R1=34\text{ k}\Omega$;

$R2=18\text{ k}\Omega$;

$C1=78\text{ nF}$;

$C2=680\text{ nF}$;

Figura 1 - Planta Analógica

Foi solicitada na descrição do projeto a definição das variáveis de estado V_{c1} e V_x , as matrizes de estado foram alcançadas conforme nos cálculos da **Figura 2 - Cálculos das matrizes de estado**.

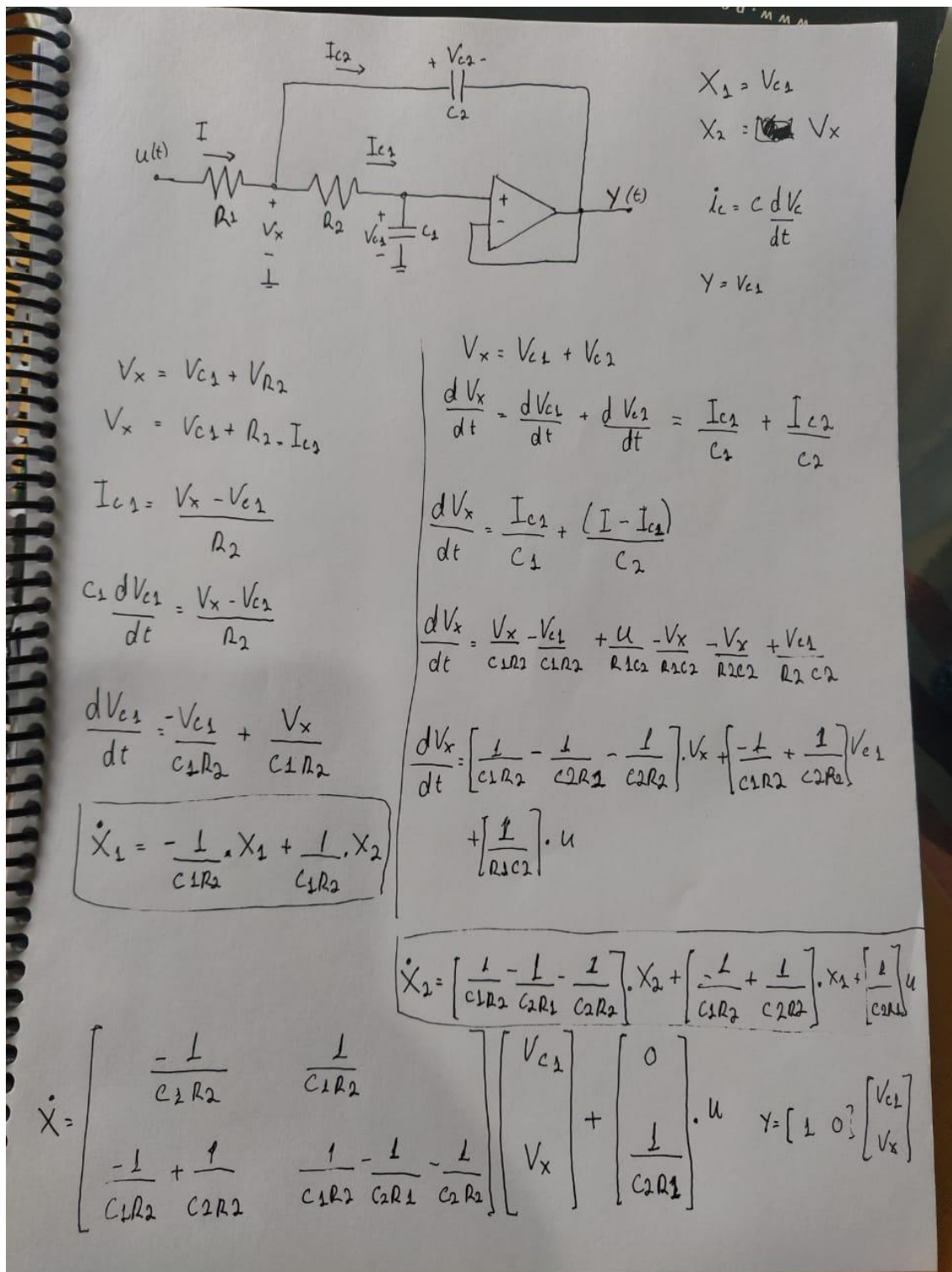


Figura 2 - Cálculos das matrizes de estado

Analisando a planta por meio de um script em python encontrou-se os seguintes polos complexos conjugados:

S1 = -62.47597078 + 164.02269593j

S2 = -62.47597078 - 164.02269593j

E a resposta ao degrau observada na **Figura 3 - Resposta ao degrau de planta.**

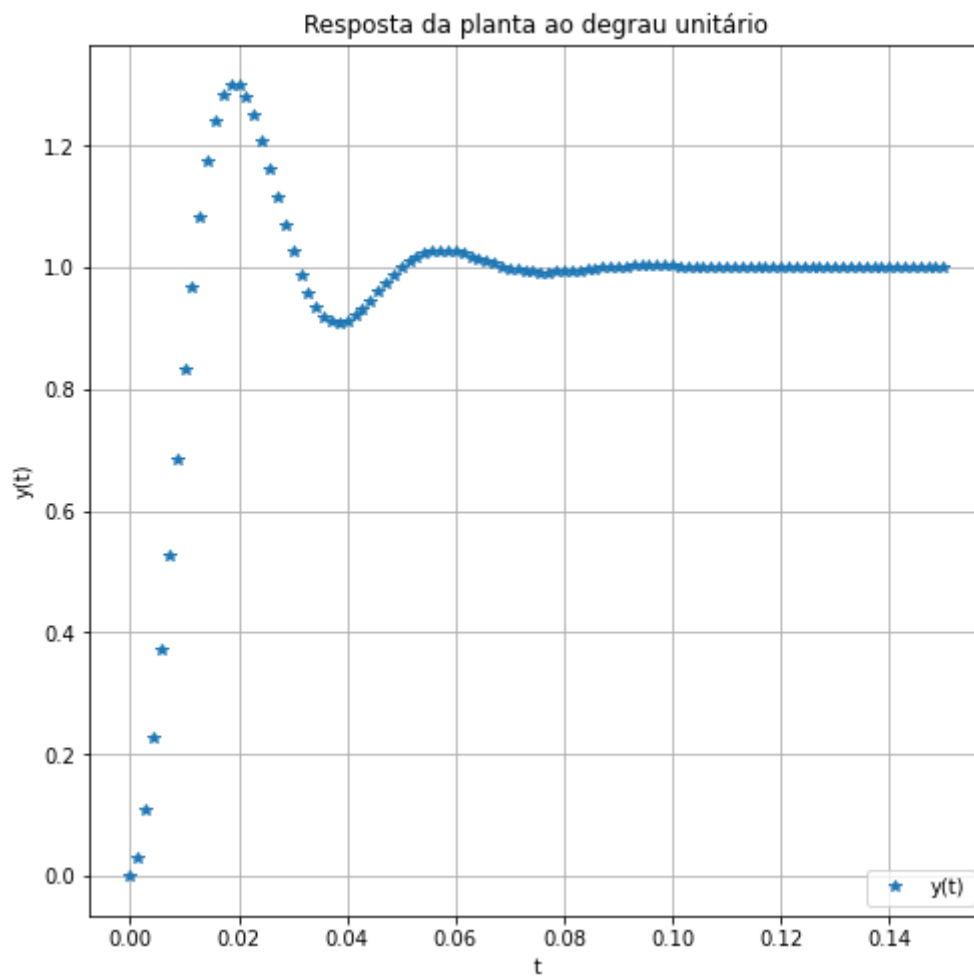


Figura 3 - Resposta ao degrau de planta

3. Parâmetros desejados

O documento referência deste projeto especifica os seguintes requisitos para o circuito controlado:

$T_{s5\%}$ = número de letras do seu nome completo (ms);
 M_p = 2 X Número de letras do seu primeiro nome (%);
 Erro nulo em regime permanente para resposta ao degrau;

Neste caso:

$T_{s5\%} = \text{length}(\text{'jhonatandefreitaslang'}) = 21 \text{ ms}$

$M_p = 2 * \text{length}(\text{'jhonatan'}) = 16\%$

E o requisito de erro nulo em regime permanente para resposta ao degrau que é atendido projetando um sistema de tipo 1, com um integrador.

Considerando que esse sistema deve ser implementável na prática, o período de amostragem (T_s) deve ser de 10 a 15 vezes menor do que o tempo de acomodação desejado ($T_{s5\%}$). Adotando 10 vezes como escolha, temos:

$$T_s = \frac{T_{s5\%}}{10} = \frac{21ms}{10} = 2.1 ms$$

E a frequência de amostragem:

$$F_s = \frac{1}{T_s} = 476.2 Hz$$

Esses valores de T_s e F_s foram adotados para cálculo dos polos s_1 e s_2 do controlador.

Porem como demonstrado a seguir, um terceiro polo 10 vezes mais rápido que o demais é escolhido de forma arbitrária, logo a frequência de amostragem foi recalculada da seguinte forma:

$$F_s = 20 * F_s = 9523.8 Hz$$

4. Projeto do controlador por alocação de polos

Com impostos nos requisitos calculou-se novos valores para ζ , ω_n , ω_d e os novos polos desejados no sistema realimentado.

$$\zeta = 0.5039$$

$$\omega_n = 283.5209$$

$$\omega_d = 283.5209$$

Polos dominantes de malha fechada:

$$s_1 = -\zeta * \omega_n + j\omega_d = -142.85714285714286 + 244.89986360271635j$$

$$s_2 = -\zeta * \omega_n - j\omega_d = -142.85714285714286 - 244.89986360271635j$$

$$s_3 = -10 * \text{abs}(s_1) = -2835.2091008942393$$

Após isso verificou-se a controlabilidade do sistema, que no caso é de estado completamente controlável, verificando se o posto da matriz de controlabilidade e a ordem da matriz de controlabilidade possuem o mesmo valor.

Em seguida foram calculados os ganhos para o controle por retroação a partir das matrizes expandidas, utilizando o método de Ackermann no script em python. Os valores ficaram:

$$K1 = -41.36262504$$

$$K2 = 69.26685981$$

$$Ki = -7397.93004615$$

O sistema foi simulado com a função **step** e os valores de sobre sinal e tempo de acomodação encontrados foram:

Mp medido = 0.15980502787376796 **Ts5% medido** = 0.019036027263875367

Para o mesmo circuito, utilizando equações recursivas os valores de sobre sinal e tempo de acomodação encontrados foram:

Mp medido = 0.16920807085651185 **Ts5% medido** = 0.01901260504201681

A gráfico da resposta ao impulso do sistema controlado calculado por equações recursivas pode ser visto na **Figura 4 - Resposta ao impulso do sistema controlado eq. recursivas**.

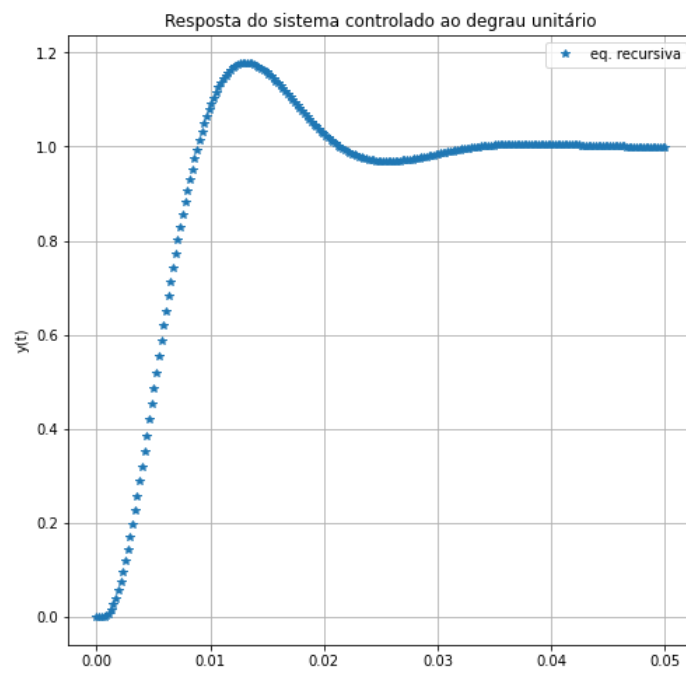


Figura 4 - Resposta ao impulso do sistema controlado eq. recursivas

5. Projeto do observador de ordem plena

Foi um requisito deste projeto o desenvolvimento de um observador de ordem plena, para que as variáveis de estado pudessem ser mensuradas a partir de sinais alimentados com informações apenas da entrada e da saída da planta original. O observador foi implementado seguindo a topologia da **Figura 5 - Topologia observador de estados de ordem plena.**

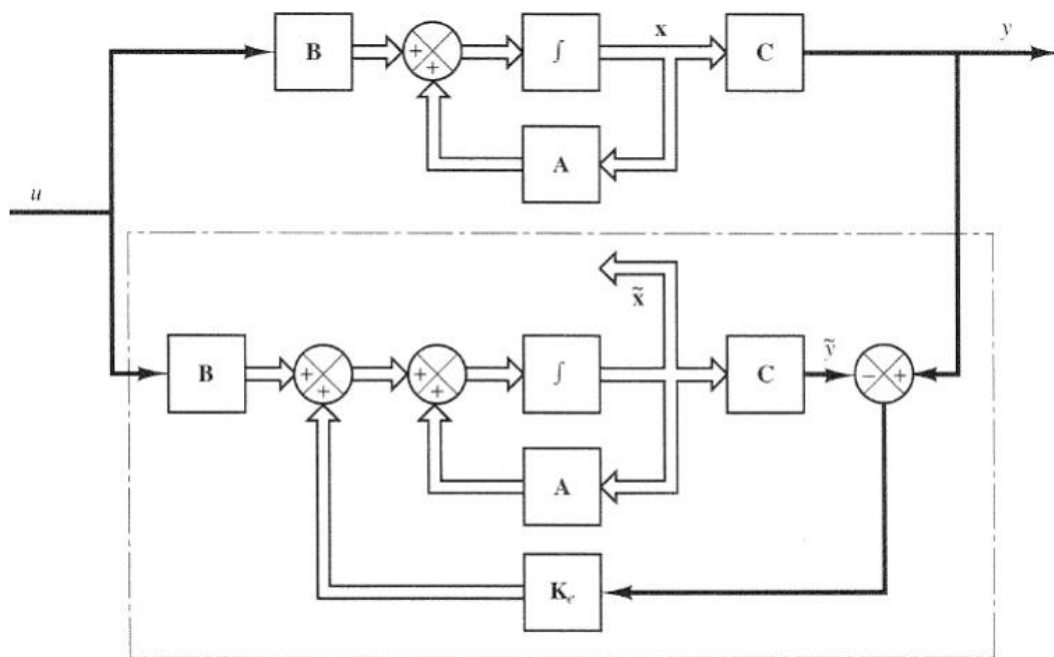


Figura 5 - Topologia observador de estados de ordem plena

O primeiro passo no projeto do observador de estados foi a verificação da matriz de observabilidade. Verificando se o posto da matriz de observabilidade e a ordem da mesma possuem o mesmo valor pode-se dizer que a matriz é observável ou não. No caso, o posto e a ordem da matriz são iguais a 2, logo o sistema é observável.

Os polos desejados para o observador foram escolhidos de modo que o observador tivesse o dobro da velocidade do controlador, da seguinte forma:

$$s_{1_obs} = -2 * abs(s_1) = -567.0418201788478$$

$$s_{2_obs} = -2 * abs(s_2) = -567.0418201788478$$

E a matriz de ganhos do observador calculada pelo método de Ackermann possui os seguintes valores:

$$Ke = \begin{bmatrix} 1009.1316988; \\ 1240.28172257 \end{bmatrix}$$

A resposta ao degrau do sistema da planta com observador foi simulada com equações recursivas e o resultado pode ser visualizado na **Figura 6 - Estados da planta e estados observados**.

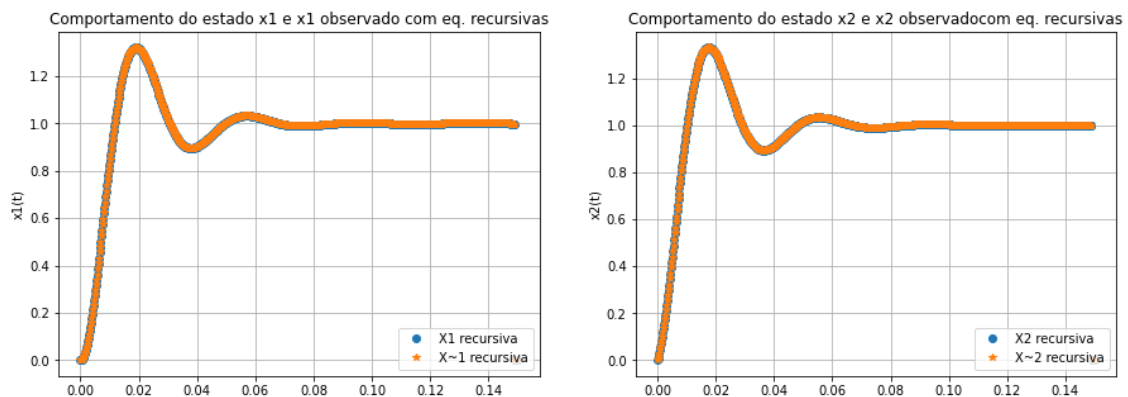


Figura 6 - Estados da planta e estados observados

Nota-se que o estado x1 e x1 observado coincidem, assim como os estados x2 e x2 observado.

6. Simulação do sistema completo com controlador, observador e planta

Juntando os blocos calculados da planta, observador e controlador, implementou-se um servossistema com a topologia da **Figura 7 - Topologia servossistema com observador**.

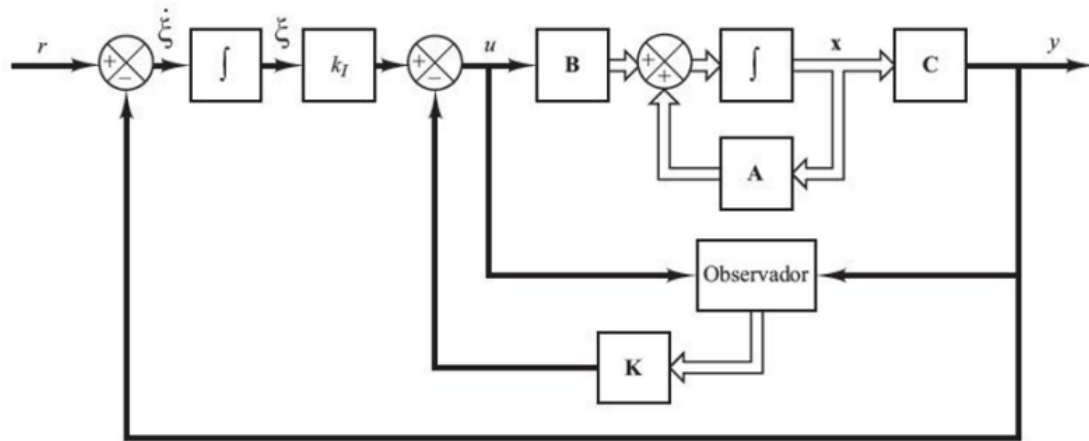


Figura 7 - Topologia servossistema com observador

A simulação do sistema utilizou a implementação por equações recursivas, e neste caso foi aplicado primeiro um degrau de 0V para 1V.

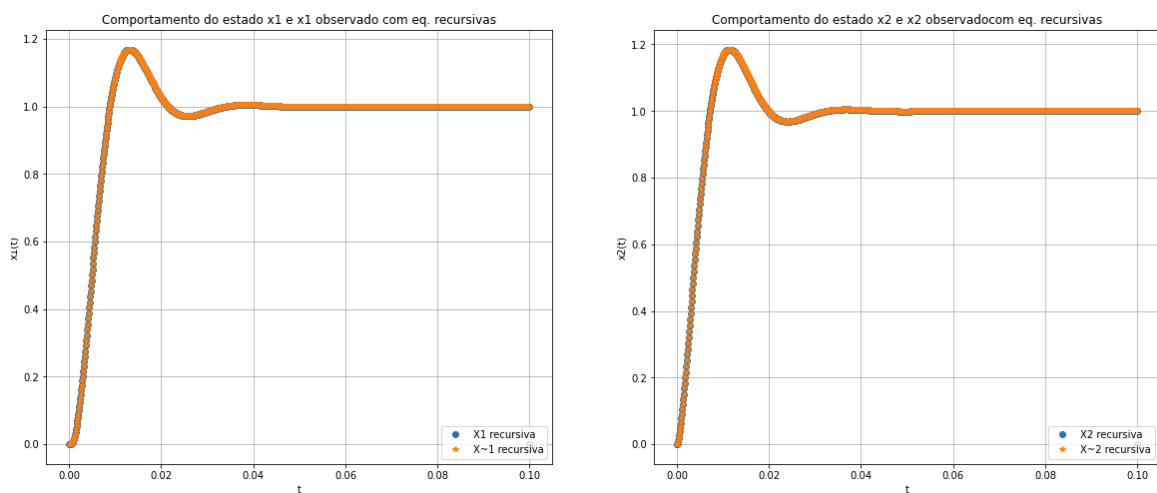


Figura 8 - Planta observada e controlada degrau unitário

Os valores de sobre sinal e tempo de acomodação foram:

Mp medido = 0.16832179694466684 **Ts5% medido** = 0.018907563025210086

Observe na **Figura 8 - Planta observada e controlada** que o sistema controlado atende as características de sobressinal e tempo de acomodação, mas embora os valores sejam próximos aos da primeira simulação, não são os mesmos, devido a erros de arredondamento durante os cálculos.

Em seguida o degrau de referência de 1V para 1.5V. Veja na **Figura 9 - Planta observada e controlada com sinal de referência**.

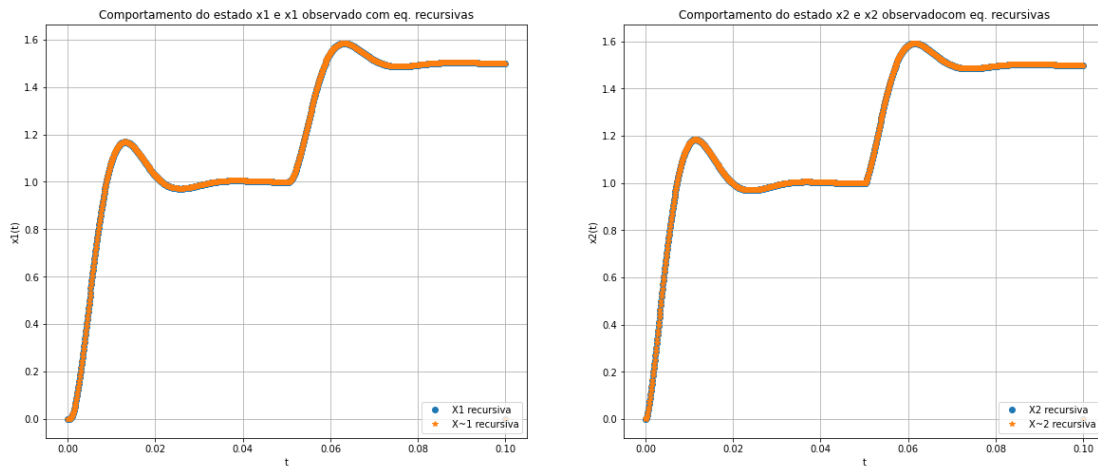


Figura 9 - Planta observada e controlada com sinal de referência

Ainda utilizando a equação recursiva foi possível visualizar a ação de controle, ou seja, os valores de tensão que o controlador terá que atingir para levar a planta ao comportamento desejado.

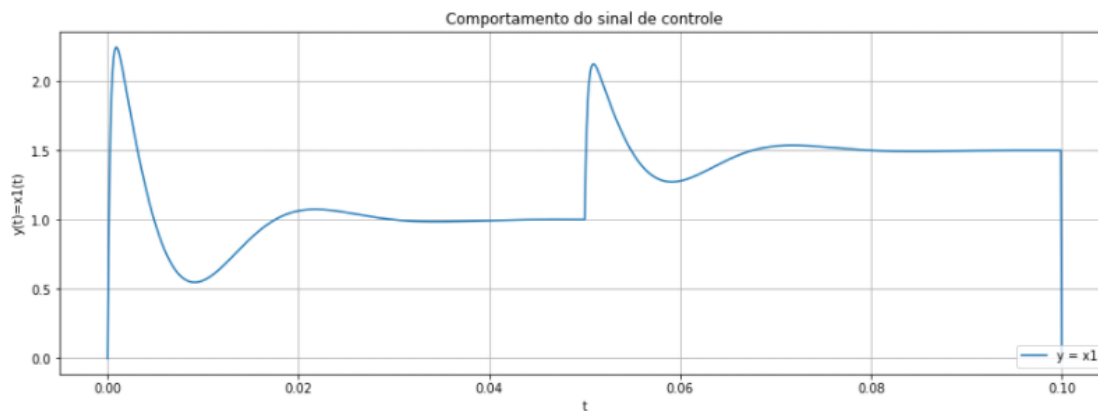


Figura 10 - Ação de controle eq. recursiva

Note na **Figura 10** - que o valor máximo ao qual a função chegou foi de 2.5 V, ficando dentro do alcance do conversor analógico/digital da grande maioria dos microcontroladores, que vai de 0V a 3.3 V.

7. Fluxograma implementação em um microcontrolador

Pensando neste controlador como algo aplicável a um microcontrolador, utilizar-se-ia o ADC do microcontrolador para fazer a leitura da realimentação, respeitando a devida conversão de escala, uma saída pwm como saída do controlador para a planta,

um timer programado com o mesmo intervalo T_s calculado anteriormente para gerar interrupções no laço principal e toda operação de cálculo seria feita dentro da interrupção do timer.

De acordo com o fluxograma seguinte:

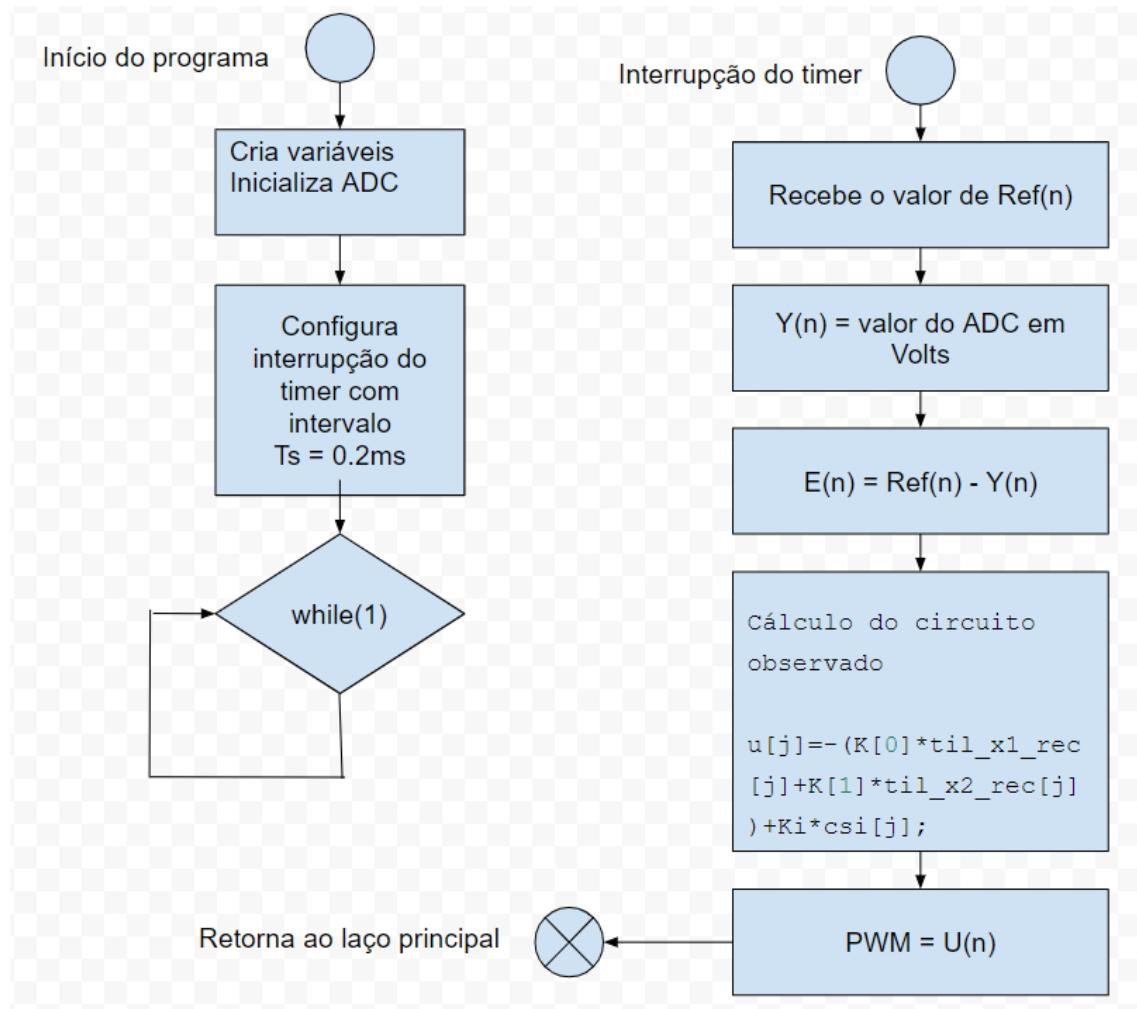
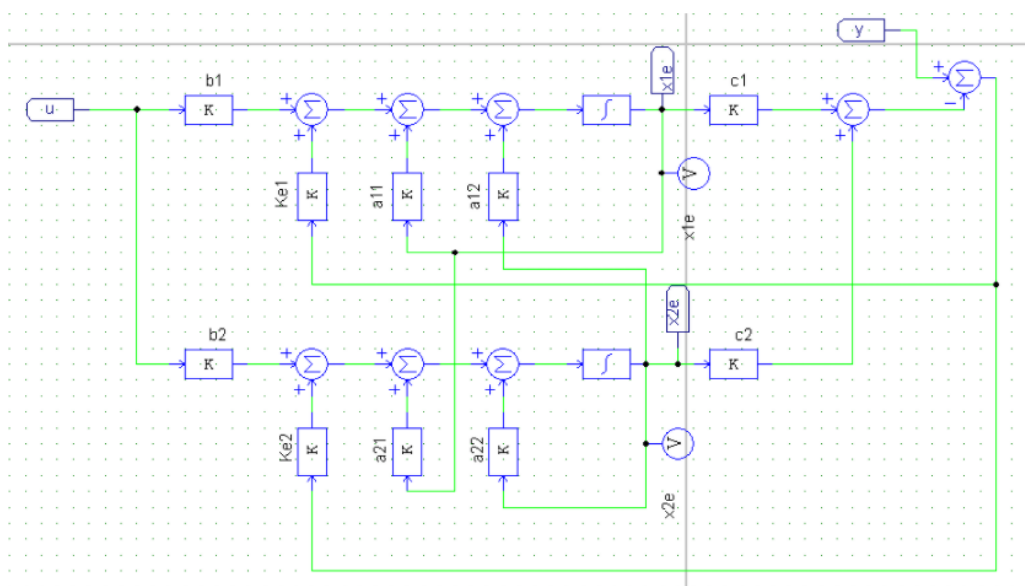
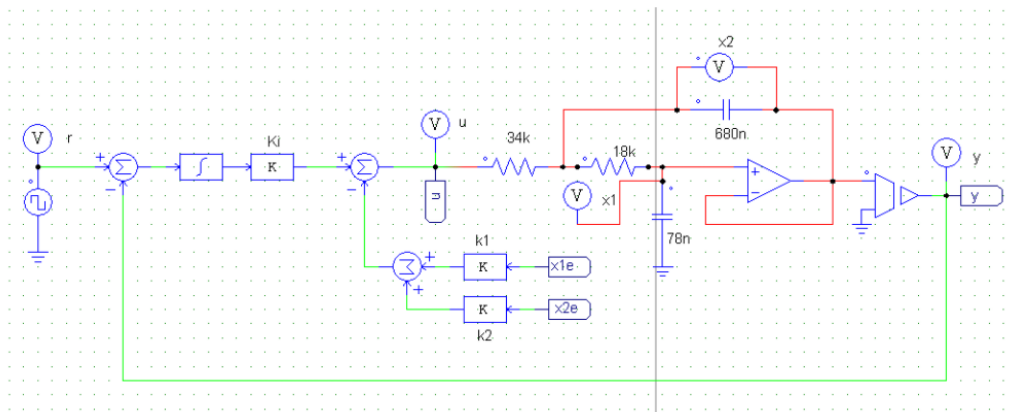


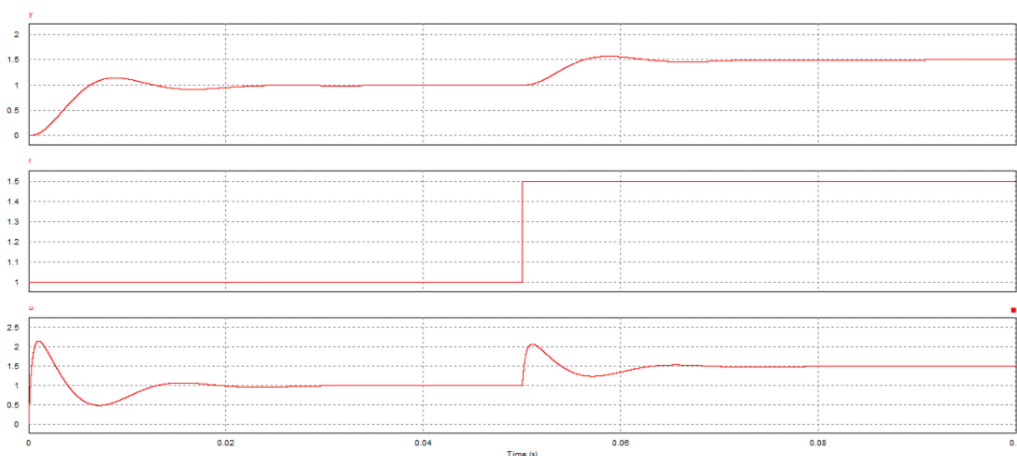
Figura 11 Fluxograma microcontrolador

8. Simulação no PSIM

O mesmo sistema foi simulado no PSIM, afim de aferir se o modelo por variáveis de estados e as variáveis de controle condizem com a prática. Observe o circuito nas figuras **Figura 12 - Simulação PSIM parte 1** e **Figura 13 - Simulação PSIM parte 2**.



Os resultados dos gráficos podem ser observados nas figuras **Figura 14 - Saída simulação PSIM parte 1** e **Figura 15 - Saída simulação PSIM parte 2**.



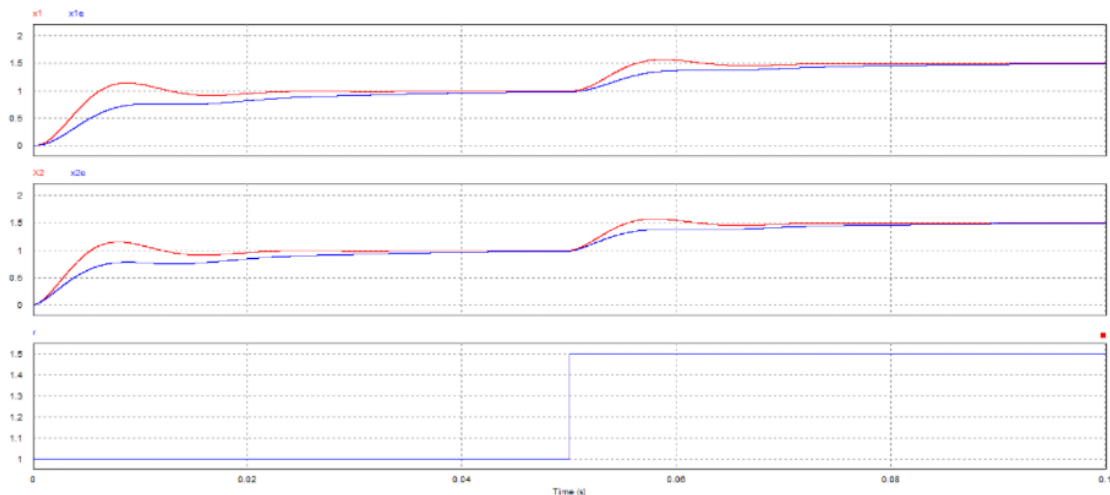


Figura 15 - Saída simulação PSIM parte 2

9. Conclusão

Pode-se concluir que a modelagem por espaço de estados foi capaz de representar suficientemente bem o sistema físico, tornando possível realizar um controle por alocação de polos eficiente com relação aos parâmetros desejados. O observador de estados também teve um bom desempenho, apresentando para as variáveis de estado observadas um comportamento quase idêntico às variáveis do modelo da planta.

Um fator que se demonstrou crítico para a implementação do sistema foi a frequência de amostragem, que precisa ser rápida o suficiente para que o observador de estados e o controlador de estados consigam atuar. Em testes onde a frequência de amostragem não foi rápida o bastante o sistema não pode estabilizar ou não alcançou os parâmetros de sobre tensão e tempo de acomodação desejados. A simulação do PSIM também demonstrou uma pequena diferença nestes valores para as variáveis observadas por conta da frequência de amostragem.

A implementação prática com microcontrolador seguindo o fluxograma descrito pode apresentar algumas variações no resultado, pois a planta é composta de componentes físicos que sofrem desgaste e a frequência de amostragem do controlador será aproximada, mas não exatamente a calculada.

10. Referências

Damien Prêle. Advanced Electronic Systems . Master. Advanced Electronic Systems, Hanoi, Vietnam. 2016, pp.140. ffccl-00843641v5f. Disponível em: <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00843641v5/document>