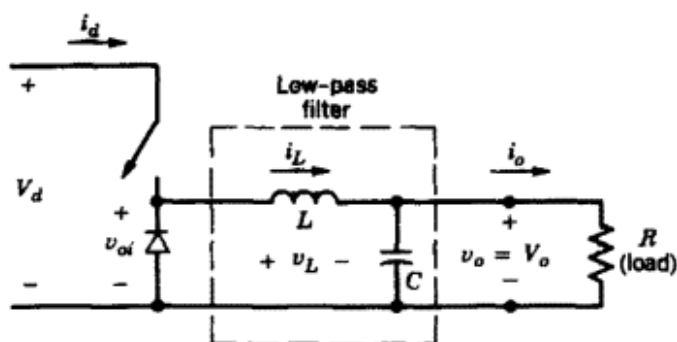


| | | |
|---|---|------------------|
|  | Universidade Federal de Pernambuco Departamento de Engenharia Elétrica Laboratório de Engenharia de Controle | |
| | Relatório: Controle Cascata | |
| | Aluno: LUCAS GABRIEL FERREIRA LIMA | Turma: |
| | Bancada: | Data: 10/03/2024 |

1) Objetivos Gerais

Demonstrar o funcionamento de diferentes tipos de controle em malha fechada de um conversor Buck (Figura 1), comparando a implementação em malha simples e malha dupla.

Figura 1: Conversor Buck



Os valores de projeto associados ao conversor foram expostos na tabela 1, e se mantêm constantes para todas as 3 partes da atividade.

Tabela 1: Valores de projeto do conversor Buck

| Parâmetro do Conversor | Valor |
|-------------------------------------|-------------|
| Tensão de Entrada (V_g) | 250 V |
| Indutância (L) | 1 mH |
| Capacitância (C) | 20 μ F |
| Resistência da Carga (R) | 10 Ω |
| Frequência de chaveamento (f_s) | 10 kHz |

2.1) Parte 1: Controle em malha simples do Conversor buck

2.1) Objetivos

Projetar e simular o funcionamento de um controlador em malha simples para um conversor buck (Figura 1), controlando a tensão de saída do mesmo, de tal maneira que obedeça às restrições descritas na tabela 2.

Tabela 2: Restrições de controle da Parte 1

| Parâmetro | Faixa de Valores Aceitáveis |
|-----------------------|-----------------------------|
| Erro estacionário | Igual a 0 |
| Tempo de Assentamento | Entre 1 e 5 ms |

2.2) Metodologia

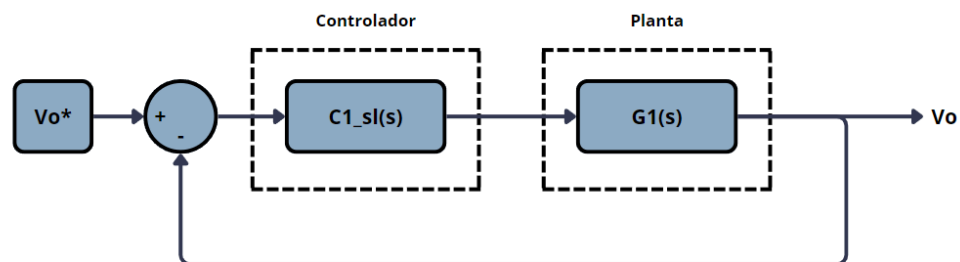
Através do *software* MATLAB/Simulink, e utilizando os valores de projeto da tabela 1, foi construído um modelo do conversor buck. Matematicamente, o controlador pode ser representado pela equação transferência da figura 2, vista abaixo.

Figura 2: Função transferência da planta

$$G_1(s) = \frac{V_g}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}.$$

O diagrama de blocos do sistema de controle de tensão do conversor é dado abaixo:

Figura 3: Diagrama de blocos do sistema



É importante deixar explícito que, de maneira prática, a saída do controlador é o *Duty Cycle* do PWM que controla a chave.

Em código, o controlador 1 foi intitulado “C1_sl”(Controlador 1, Single Loop) para não ser confundido com os demais, sendo projetado a partir de um script em *MATLAB*, e, a partir dele, a função transferência do controlador é passada para simulação no *Simulink*.

2.3) Resultados

Para projetar o controlador, primeiro se faz necessário entender a planta (G1), o mapa de pólos e zeros da mesma foi plotada e exposta na figura 4, seguida por sua função transferência na figura 5.

Figura 4: Mapa de pólos e zeros da planta G1(s)

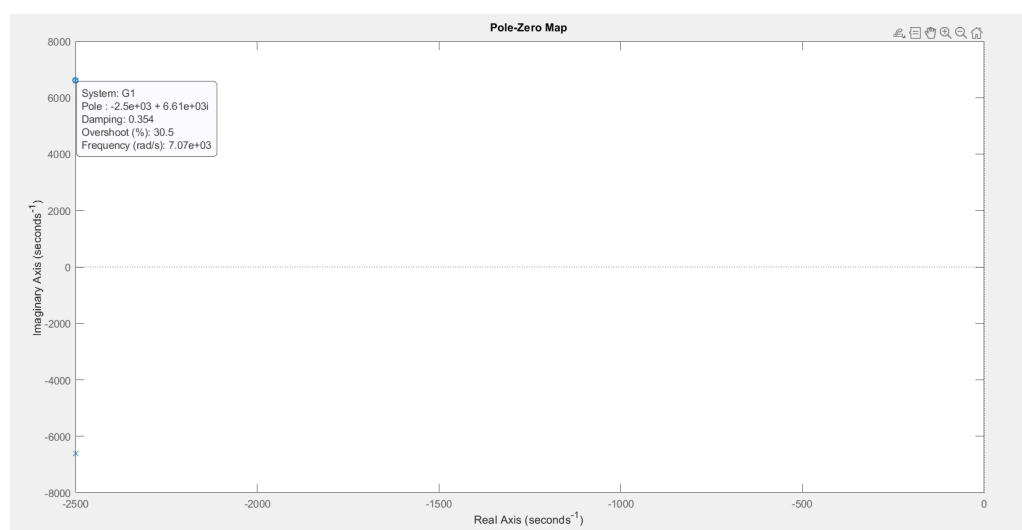


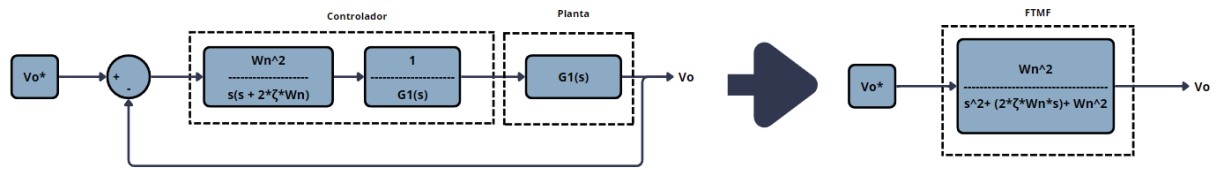
Figura 5: Função transferência da planta G1(s)

$$G1 = \frac{250}{2e-08 s^2 + 0.0001 s + 1}$$

É possível perceber que o alto valor da parte imaginária do pólo deixa o sistema bem mais oscilatório, logo decidiu-se utilizar o cancelamento dos mesmos e usar uma equação canônica de segunda ordem para a função transferência de malha fechada (o modelo de referência).

Para tanto, não foi necessário o uso de fórmulas para equação do controlador, dado que o modelo de referência era notório.

Figura 6: Função Transferência do Controlador



Arbitrariamente foi escolhido que a resposta seria superamortecida ($\zeta > 1$), para tal valor, usando a equação 1 foi encontrada a relação entre os parâmetros ω_n , ζ e T_s , já assumindo a aproximação $\zeta > 0,69$.

$$Ts(5\%) = \frac{6,772\zeta - 1,967}{\omega_n} \quad (\text{Equação 1})$$

Isolando ω_n (Equação 2), é possível achar esse parâmetro com base em valores escolhidos de ζ e T_s .

$$\omega_n = \frac{6,772\zeta - 1,967}{T_s} \quad (\text{Equação 2})$$

As informações do projeto do controlador foram expostas na tabela 3.

Tabela 3: Dados do controlador

| Informação do controlador | Dado |
|--|-------------------------------|
| Tipo de estratégia de Projeto | Cancelamento de Pólos e zeros |
| Coefficiente de Amortecimento (ζ) | 1.5 |
| Tempo de assentamento (T_s [5%]) | 3 ms |
| Frequência natural amortecida (ω_n) | 2,73 k [Rad/s] |

A Partir desses dados, foi possível encontrar a função transferência do controlador:

Figura 7: Função Transferência do Controlador

$$\frac{0.00059638 (s^2 + 5000s + 5e07)}{s (s+8191)}$$

A figura 8 contém a prova matemática que o erro estacionário para o degrau é zero (algo que já era esperado, dado que o controlador é tipo 1, o'que garante essa condição)

Figura 8: Prova matemática do erro estacionário zero para entrada degrau

$$FTMF(s) = \frac{37.27 s^2 + 1.864e05 s + 1.864e09}{5e-06 s^4 + 0.06595 s^3 + 492 s^2 + 2.234e06 s + 1.864e09}$$

$$R(s) = \frac{6}{s}$$

$$ess(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s * [(1 - FTMF(s)) * R(s)]$$

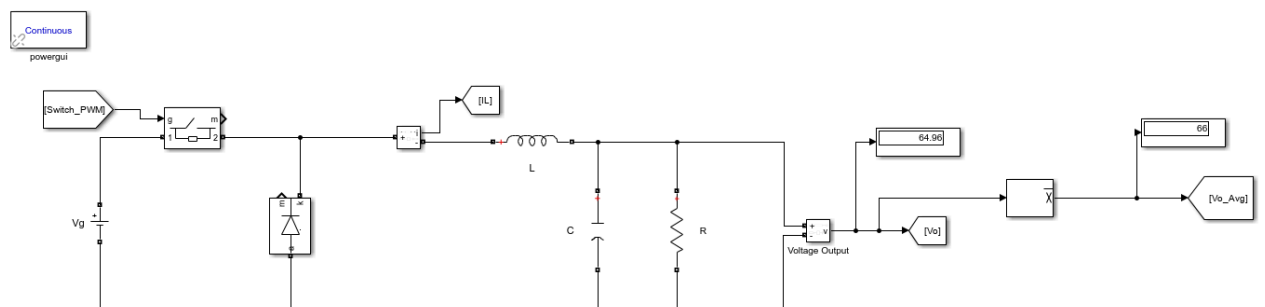
$$ess(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} 6 * \left[\left(1 - \frac{37.27 s^2 + 1.864e05 s + 1.864e09}{5e-06 s^4 + 0.06595 s^3 + 492 s^2 + 2.234e06 s + 1.864e09} \right) \right]$$

$$ess(\infty) = 6 * [1 - 1] = 0$$

$$ess(\infty) = 0$$

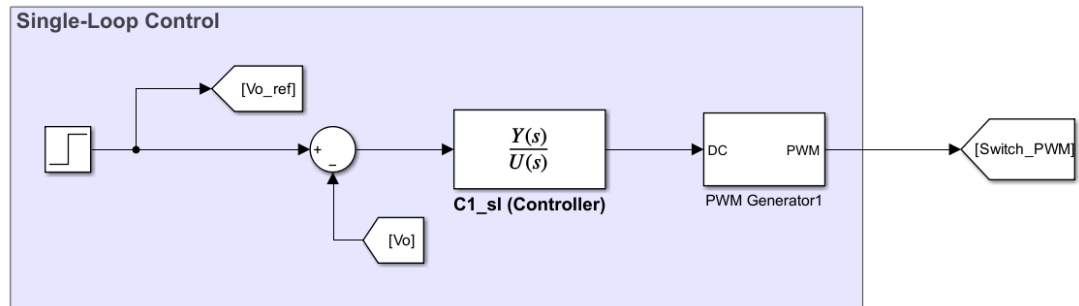
Para simulação, um modelo do conversor no Simulink foi projetado tal qual a figura 1, a simulação pode ser vista abaixo.

Figura 9: Simulação do Conversor Buck



Onde o sinal de saída é a tensão da carga (Vo), enquanto o sistema é controlado pelo valor do ciclo de trabalho do PWM na chave (tal qual na figura abaixo), cuja frequência é fs (tal qual visto na tabela 1). Adicionalmente, para o gráfico da simulação, foi usado o valor médio de Vo (Vo_avg)

Figura 10: Blocos do controle em Malha Simples



Onde o Degrau de entrada foi um valor de tensão que sai de 60 para 66V, tal qual o especificado.

Figura 11: Resposta ao Degrau do modelo usando bloco função transferência

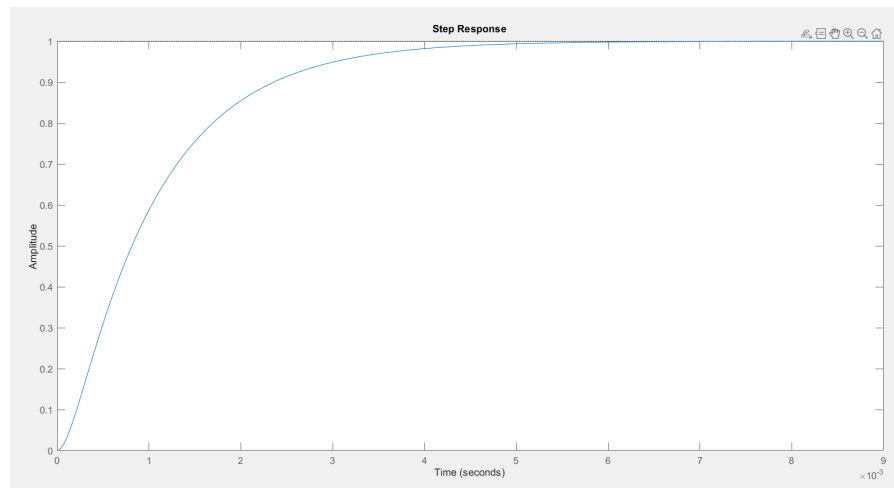
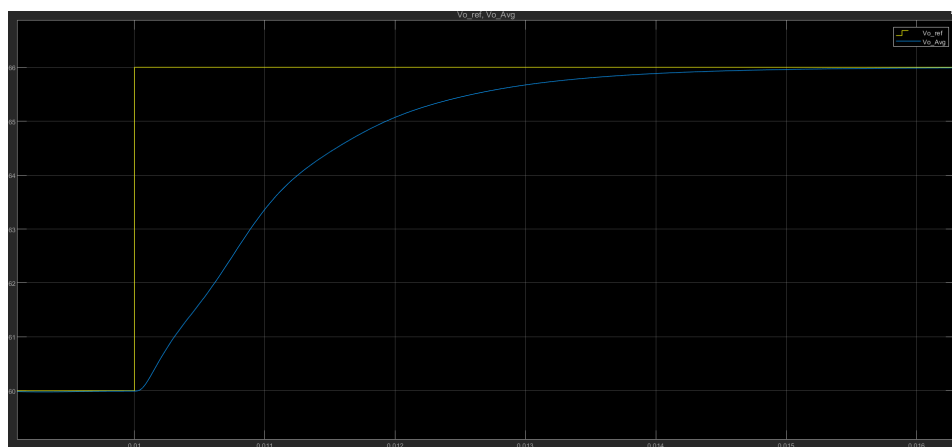


Figura 12: Resposta ao Degrau da simulação do sistema com buck



Por fim, foram comparados os valores de ambos os métodos de simulação

Tabela 4 : Comparação da resposta entre função transferência e circuito simulado

| | Modelo Matlab | Simulink Matlab |
|----------------|----------------------|------------------------|
| Ts (5%) | 3,023 ms | 3,070 ms |
| Mp% | 0% | 0% |

2.4) Conclusões

Foi possível projetar os sistemas necessários com mediana dificuldade, usando os conhecimentos teóricos de disciplinas anteriores como controle 2, controle 1 e eletrônica de potência.

3) Parte 2: Controle em malha dupla do Conversor buck

3.1) Objetivos

Projetar e validar (por meio de simulação) o controle em malha dupla do mesmo conversor Buck usado na parte anterior. Para tanto, será necessário projeto de 2 controladores (C1 e C2), cujas condições de funcionamento estão contidas na tabela 5 abaixo:

Tabela 5: Restrições do controle da Parte 2

| Parâmetro | Controlador | Faixa de Valores Aceitáveis |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Erro estacionário | C1 e C2 | Igual a 0 |
| Tempo de Assentamento | C2 (Tensão) | Entre 1 e 5 ms |
| Máximo Sobressinal percentual | C2 (Tensão) | Igual a 0% |

Para o controle, foram dadas as funções transferências G1 e G2, tal qual nas figuras 13 e 14, respectivamente.

Figura 13: Função Transferência G1(s) (Malha do controle de corrente)

$$G_1(s) = \frac{I_l(s)}{D(s)} = \frac{V_g \left(Cs + \frac{1}{R} \right)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$$

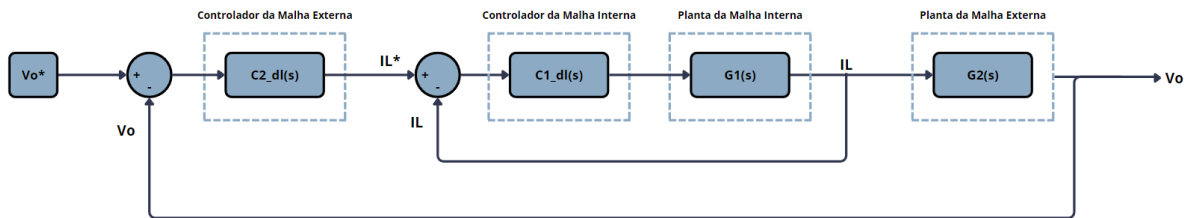
Figura 14: Função Transferência $G_2(s)$ (Malha do controle de tensão)

$$G_2(s) = \frac{V_o(s)}{I_l(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

3.2) Metodologia

O controle em malha dupla se baseia no projeto de 2 controladores que, embora atuem no mesmo sistema, são independentes entre si e controlam variáveis diferentes, as quais possuem suas próprias funções transferência, assim como é exposto na figura 15.

Figura 15: Diagrama de blocos do controle em malha dupla



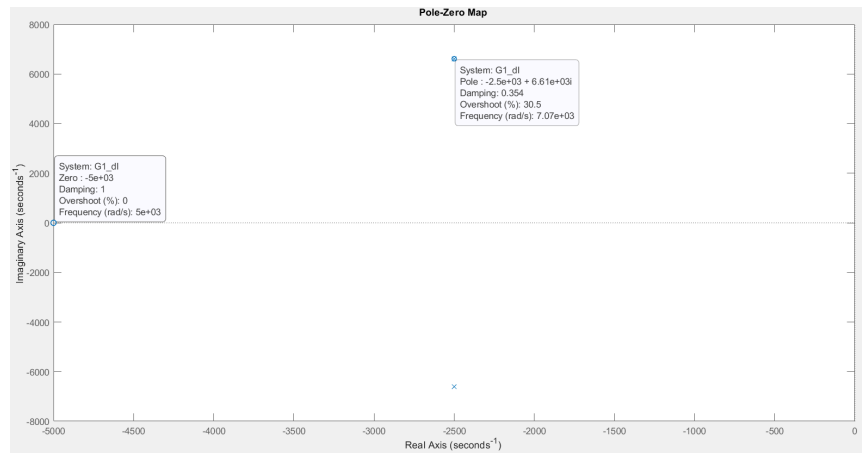
Tal independência dos controladores é possível pois a malha interna é projetada para ser bem mais rápida (ao menos 100x) que a malha externa, logo seus pólos são não dominantes e não afetam o funcionamento da malha maior.

O teste dessa diferença de velocidade e o projeto do controlador foi construído e testado em MATLAB, por fim, foi usado o simulink para validar o funcionamento correto do mesmo.

3.3) Resultados

Inicialmente, foi projetado o controlador da malha interna (controlador de corrente), para tanto, foi feito um mapa dos pólos e zeros de sua planta, como é visto na figura abaixo.

Figura 16: Mapa de pólos e zeros da planta G1(s) (Malha interna)



Em seguida, sua função transferência:

Figura 17: Função transferência da planta G1(s) (Malha interna)

Model Properties

G1_dl =

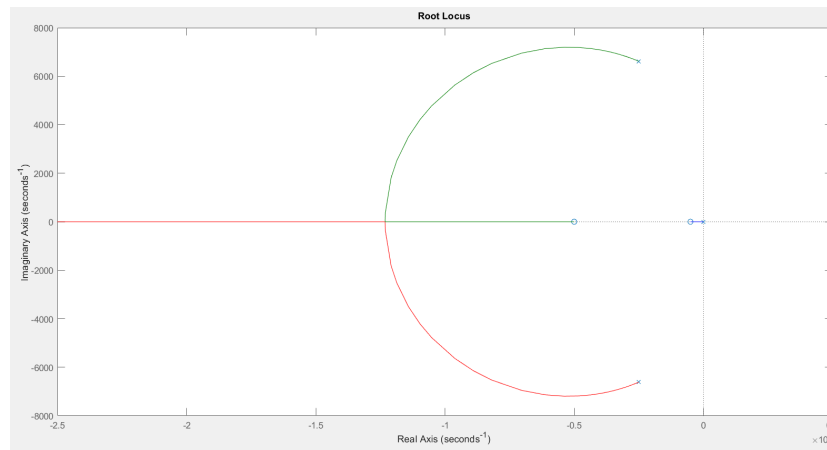
$$\frac{0.005 s + 25}{2e-08 s^2 + 0.0001 s + 1}$$

Continuous-time transfer function.

Diferente do caso anterior, onde eram apenas os 2 pólos complexos, a presença do zero torna o LGR uma opção fácil e viável, após esboços feitos a mão, ficou visível que o controlador PI seria uma ótima escolha.

É válido salientar que como ambas as plantas são tipo 0, ambos os controladores precisam ser no mínimo tipo 1 para garantir erro estacionário 0.

Figura 18: LGR do sistema



É visível que a medida que o K_p aumenta, 2 dos polos são basicamente cancelados e um tende ao infinito, logo, para um K_p suficientemente alto, o tempo de assentamento pode ser aproximado a partir da equação abaixo em função de σ , módulo da parte real da posição do polo.

$$T_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} \quad (\text{Equação 1})$$

Como foi supracitado, a velocidade entre os controladores precisa ter certo nível de proporção, sendo o interno aproximadamente 100x mais rápido que o externo, mas dado que não foi escolhido um limite para a velocidade do interno, o mesmo ficou 2000 vezes mais rápido.

Tabela 6: Dados do controlador C1

| Informação | Dado |
|-------------------------------------|-------|
| Tipo de estratégia de Projeto | LGR |
| Tempo de assentamento (T_s [5%]) | 20 us |

Figura 19: Parâmetros do controlador C1

```
C1_d1 =  
  
    0.5 s + 500  
    -----  
          s  
  
Continuous-time transfer function.
```

De maneira teórica, dado que o controlador é tipo 1, já se sabe que terá erro estacionário nulo, mas a prova matemática segue na figura 20.

Figura 20: Prova matemática de ess nulo para controlador C1

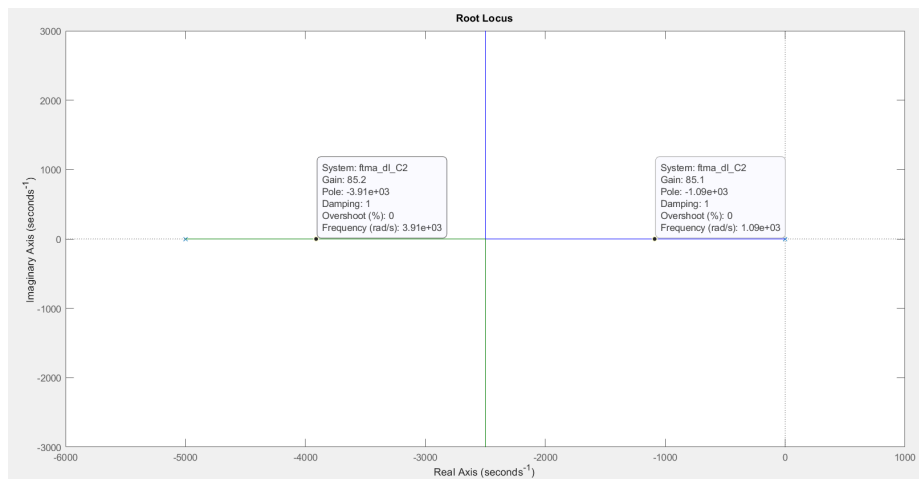
$$FTMF(s) = \frac{0.003 s^2 + 18 s + 15000}{2e-08 s^3 + 0.0031 s^2 + 19 s + 15000}$$
$$R(s) = \frac{6}{s}$$
$$\text{ess}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s * [(1 - FTMF(s)) * R(s)]$$
$$\text{ess}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} 6 * \left[\left(1 - \frac{0.003 s^2 + 18 s + 15000}{2e-08 s^3 + 0.0031 s^2 + 19 s + 15000} \right) \right]$$
$$\text{ess}(\infty) = 6 * [1 - 1] = 0$$
$$\text{ess}(\infty) = 0$$

Para a malha externa, a situação fica relativamente mais simples, já que a planta tem apenas um pólo, fica claro que um controlador puramente integrativo é possível escolher um valor do ganho K_i que torne o sistema próximo ao de primeira ordem (dado que o pólo da planta é extremamente rápido).

Figura 21: Função transferência da planta G2(s) (Malha externa)

```
G2_d1 =  
  
      10  
      -----  
    0.0002 s + 1  
  
Continuous-time transfer function.
```

Figura 22: LGR do controle de tensão e o ganho escolhido



Mesmo estando apenas 4x mais rápido, o polo mais lento já é basicamente não dominante, como é possível ver na função transferência de malha fechada do controlador. O ganho K_i e o tempo de assentamento foram colocados na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros do controlador (malha externa)

| Parâmetro | Valor |
|------------|----------|
| K_i | 85 |
| $T_s(5\%)$ | 3,058 ms |

Figura 23: FTMF da malha externa

$$\text{ftmf_dl_C2} = \frac{850}{0.0002 s^2 + s + 850}$$

Com isso, foi provado matematicamente o erro estacionário nulo para malha Externa (oque já era esperado, dado que o controlador é tipo 1).

Figura 24: Prova matemática de ess nulo para controlador C2

$$FTMF(s) = \frac{850}{0.0002 s^2 + s + 850}$$

$$R(s) = \frac{6}{s}$$

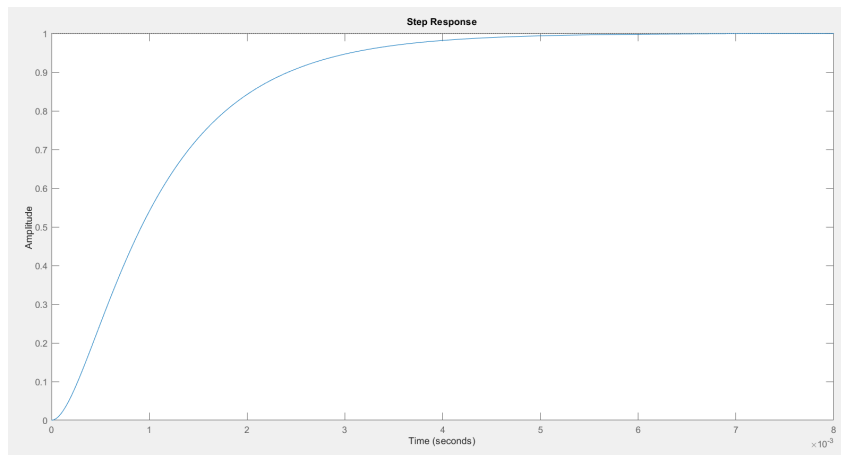
$$ess(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s * [(1 - FTMF(s)) * R(s)]$$

$$ess(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} 6 * \left[\left(1 - \frac{850}{0.0002 s^2 + s + 850} \right) \right]$$

$$ess(\infty) = 6 * [1 - 1] = 0$$

$$ess(\infty) = 0$$

Figura 25: Resposta ao Degrau no MATLAB (Controle de Tensão)



Com ambos os controles devidamente testados e validados é possível partir para o simulink.

Figura 26: Blocos do controle em Malha Dupla

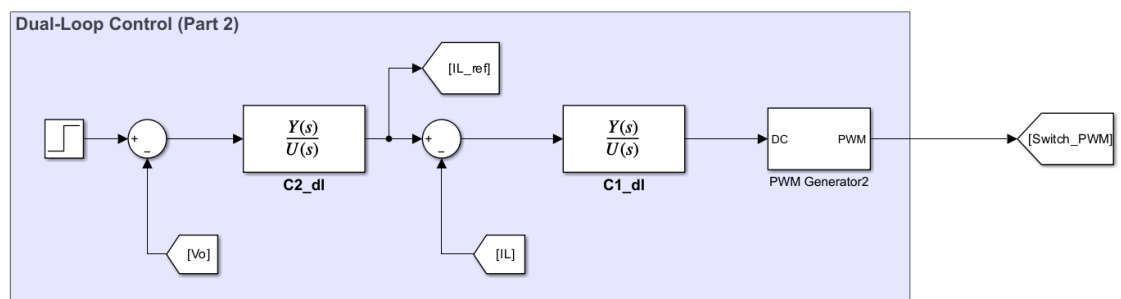


Figura 27: Resposta da corrente

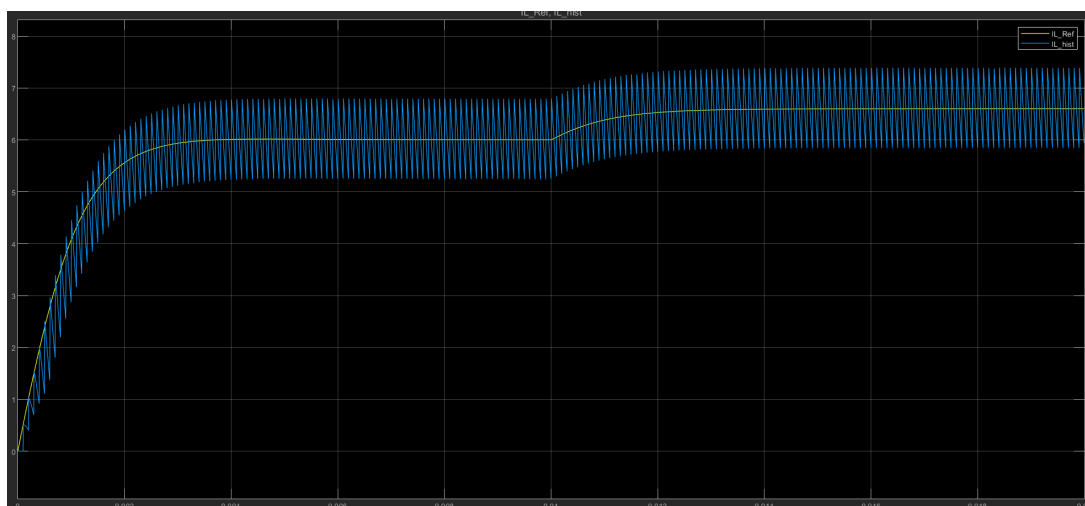
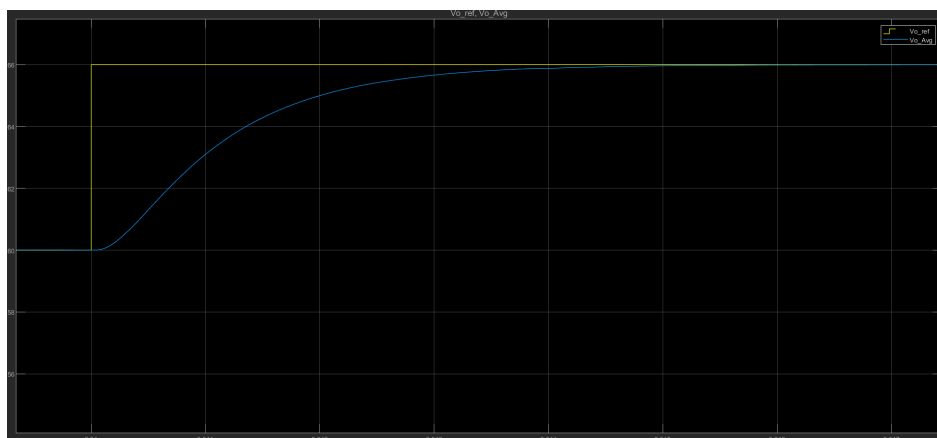


Figura 28: Resposta ao Degrau da Tensão (valor médio)



Por fim, foram comparados os sinais de tensão e corrente para controle em malhas simples e malha dupla.

Figura 29: Comparação do controle em malha simples e Malha dupla (Tensão)

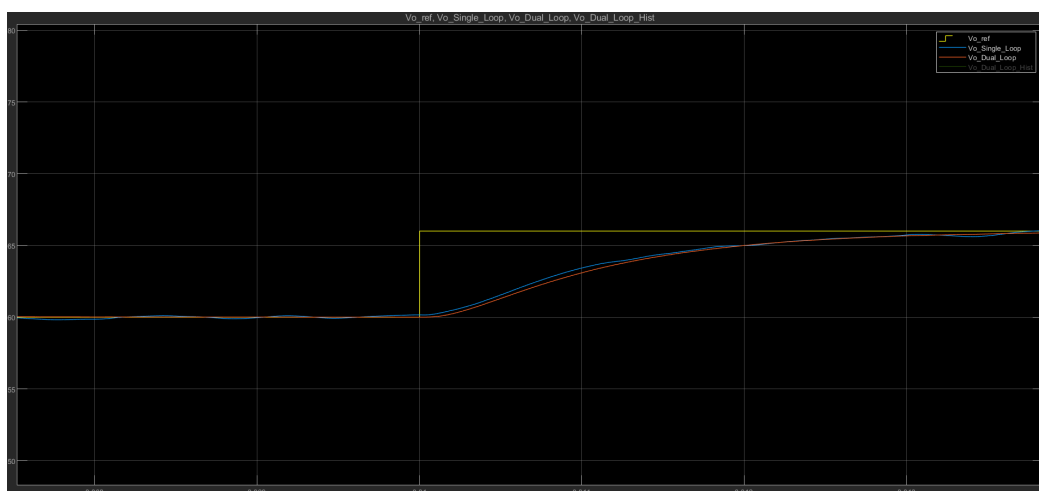


Figura 30 : Comparação do controle em malha simples e Malha dupla (Corrente)

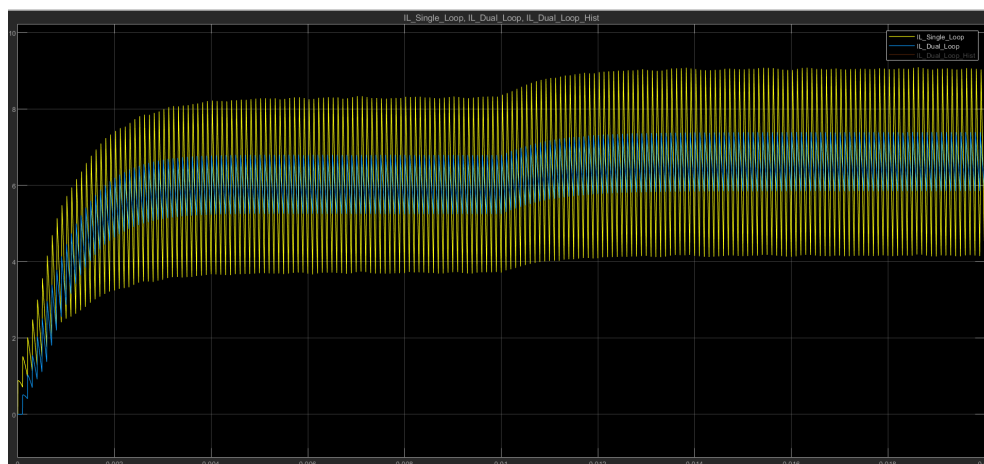


Tabela 8 : Comparação da velocidade das malhas

| | |
|---|--------------------|
| Ts (5%) Malha interna (C1) | 0,02 ms |
| Ts (5%) Malha Externa (C2) | 3,05 ms |
| Velocidade de C1 em relação a C2 | 152,5x mais rápido |

3.4) Conclusões

Foi possível validar com êxito o funcionamento do conversor buck controlado em malha dupla.

4) Parte 3: Controle em malha dupla do Conversor buck

4.1) Objetivos

Acelerar ainda mais o controle em malha dupla do sistema anterior, fazendo necessário reprojeter os controladores. O que diferencia essa parte em relação à última são as condições de controle do sistema, vistos na Tabela 9.

Tabela 9: Condições de contorno da Parte 3

| Parâmetro | Controlador | Faixa de Valores Aceitáveis |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Tempo de Assentamento | C2 | Entre 0.1 e 1 ms |
| Máximo Sobressinal percentual | C2 | Igual a 0% |

É válido salientar que tanto as funções transferência G1 e G2 quanto o diagrama de blocos do problema anterior também se mantêm os mesmos.

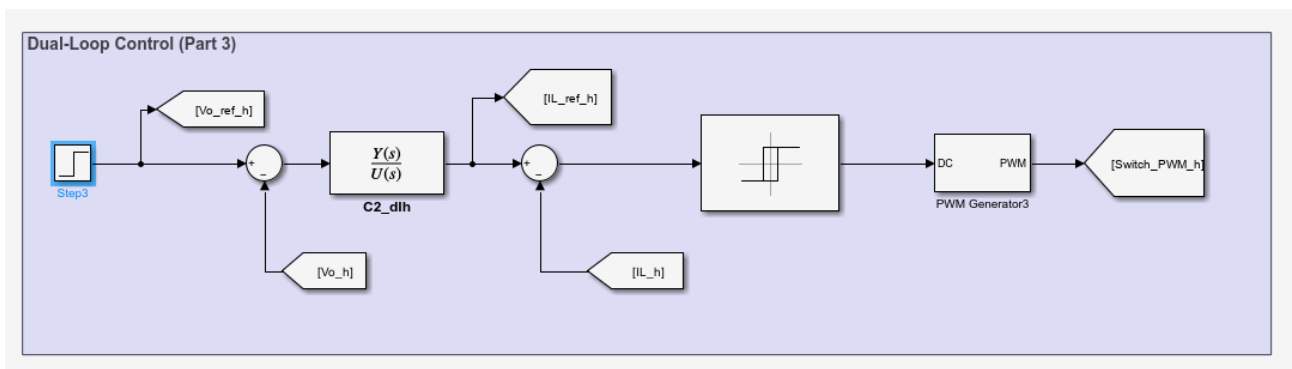
4.2) Metodologia

Analogamente às práticas anteriores, o controlador da malha externa foi projetado e testado a partir de um script do MATLAB, sendo posteriormente validado no Simulink. Por outro lado, o controle por histerese (malha interna) pôde ser montado e testado diretamente no simulink (usando o mesmo conversor das partes anteriores).

4.3) Resultados

Para o controle de corrente (malha interna) foi utilizado um controle por histerese, com intuito de acelerar a resposta do mesmo (algo que se tornou possível devido ao fato da parte 3 não ter a mesma condição de erro número que as anteriores).

Figura 31: Controlador C2 e controlador por Histerese no Simulink



Para o controle da malha externa, foi possível utilizar um controlador PI apenas fazendo seu LGR para escolha dos ganhos

Tabela 10: Função transferência controlador C2 (Tensão)

$$\frac{0.122 (s+5000)}{s}$$

Continuous-time zero/pole/gain model.

Figura 32: Resposta no Simulink (Controle de Corrente)

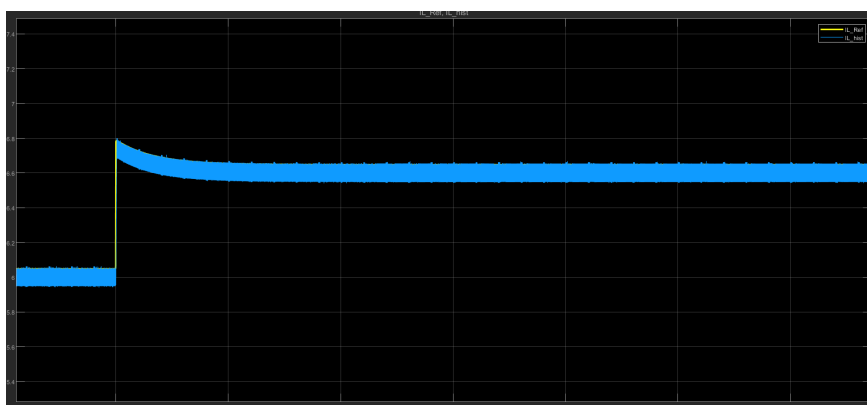


Figura 33: Resposta no Simulink (Controle de Tensão, valor médio)

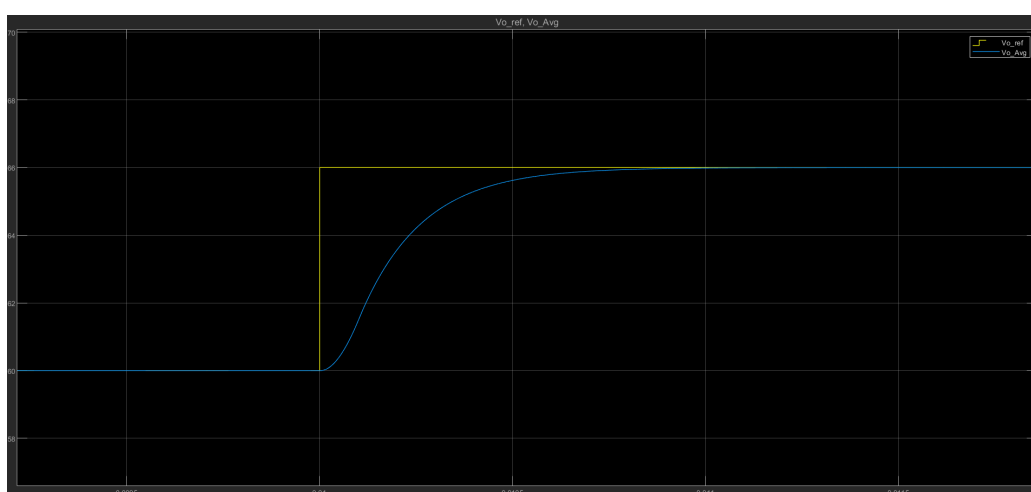


Tabela 8 : Comparação da velocidade das malhas

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Ts (5%) Malha interna (C1) | >4 us |
| Ts (5%) Malha Externa (C2) | 0,554 ms |

Por fim, tem-se a comparação dos 3 controles usados na prática (Malha simples, malha dupla e malha dupla com histerese)

Figura 34 : Comparação entre os 3 controles projetados na prática (Tensão)

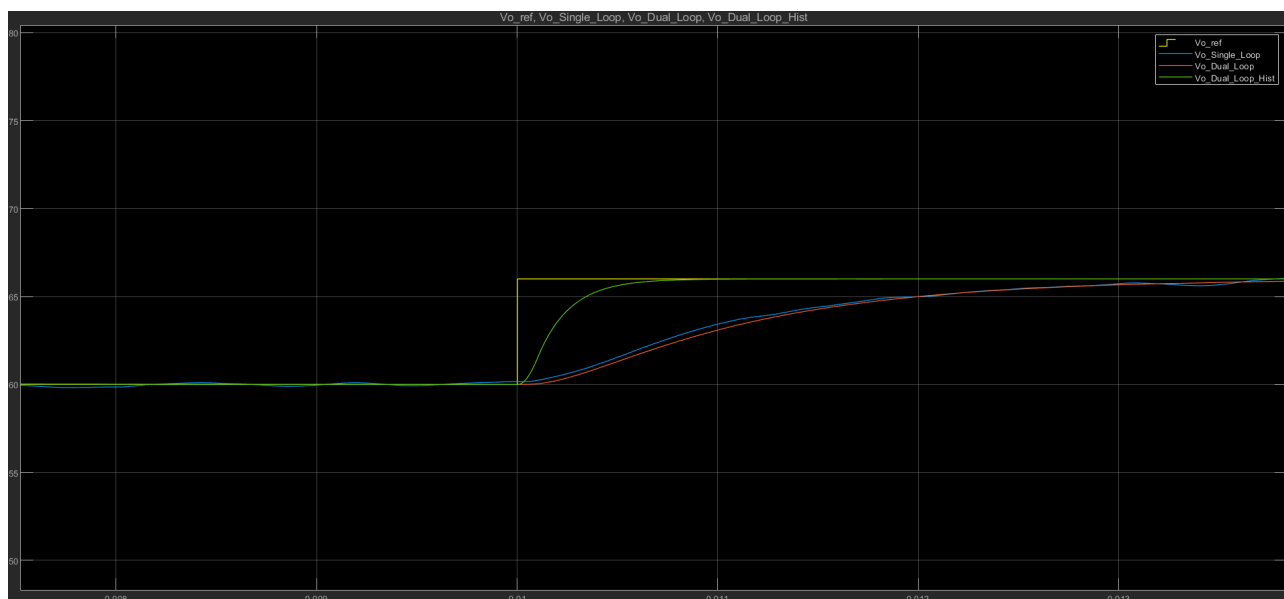
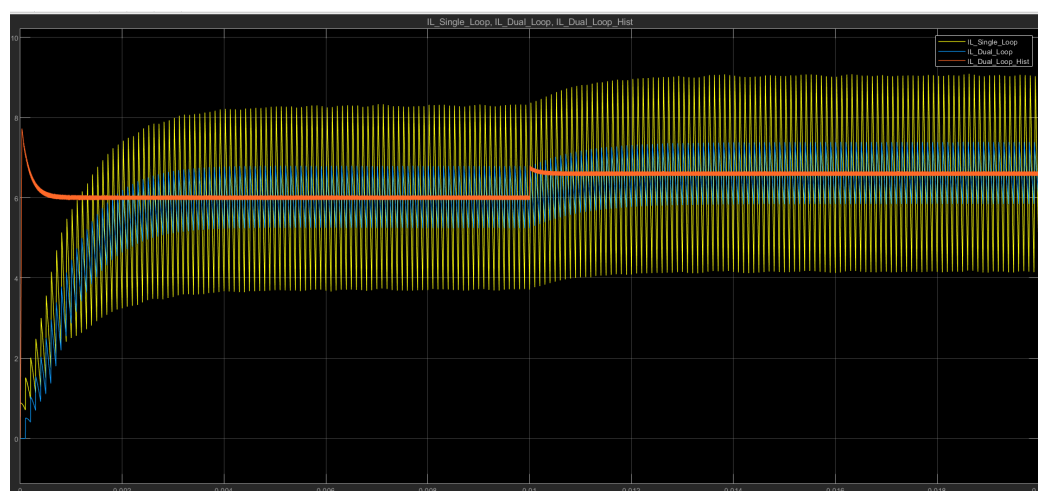


Figura 35: Comparação entre os 3 controles projetados na prática (Corrente)



4.4) Conclusões

Foi possível simular com êxito o sistema, onde as simulações adquiridas foram de acordo com o resultado teórico esperado.