



UFPE



CTG

**LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE**

PRÁTICA 7

ALUNO: LUCAS GABRIEL F. LIMA

OBJETIVOS GERAIS

Controle em malha simples e em cascata de um conversor Buck

ATIVIDADES DA PRÁTICA 6

Atividade 1

Controle em malha simples do conversor buck.



Atividade 2

Controle em malha dupla (controle em cascata) do mesmo conversor buck.

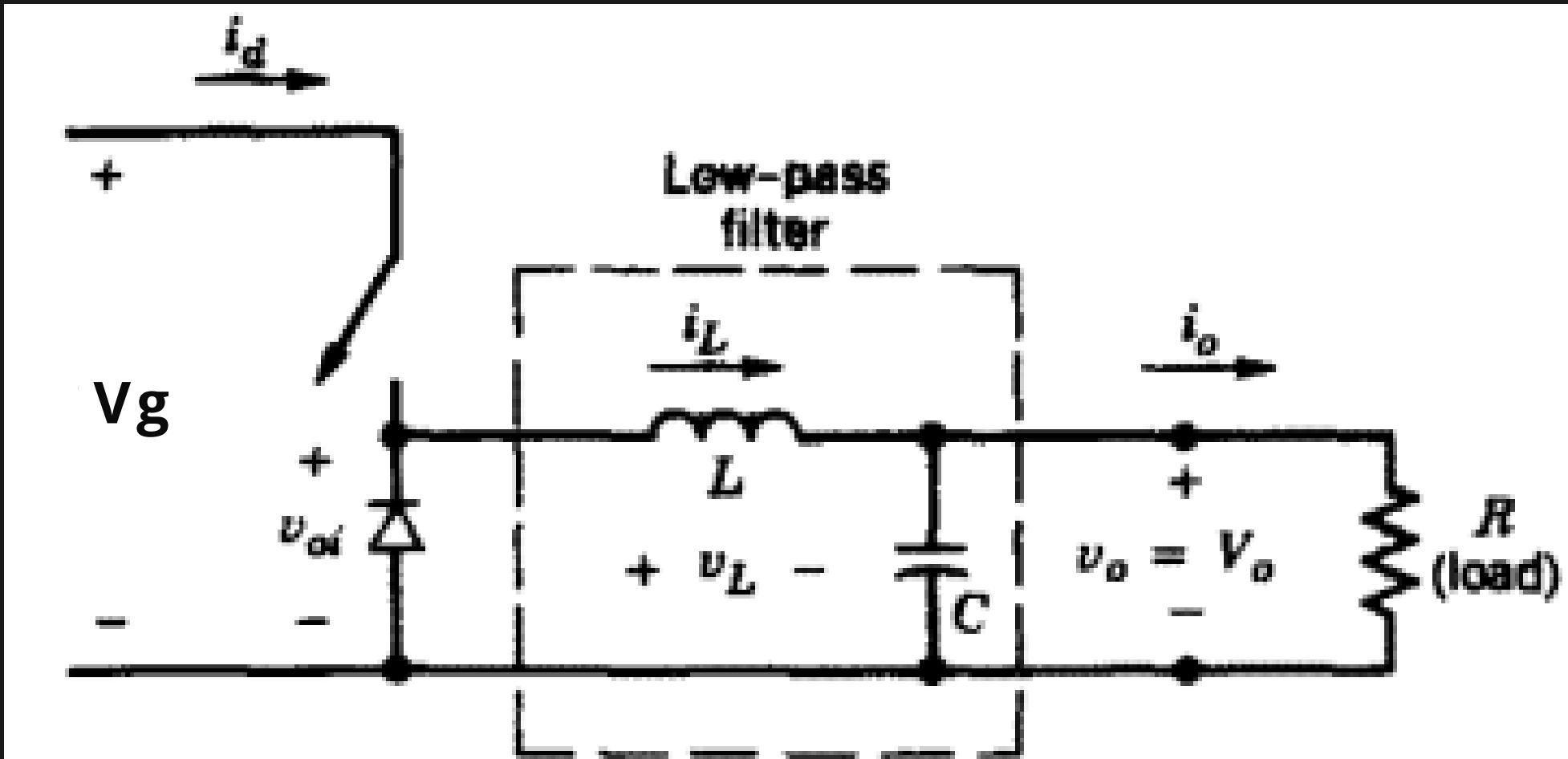
Atividade 3

controle em malha dupla feito anteriormente, porém mais rápido



CONVERSOR BUCK

CONVERSOR BUCK



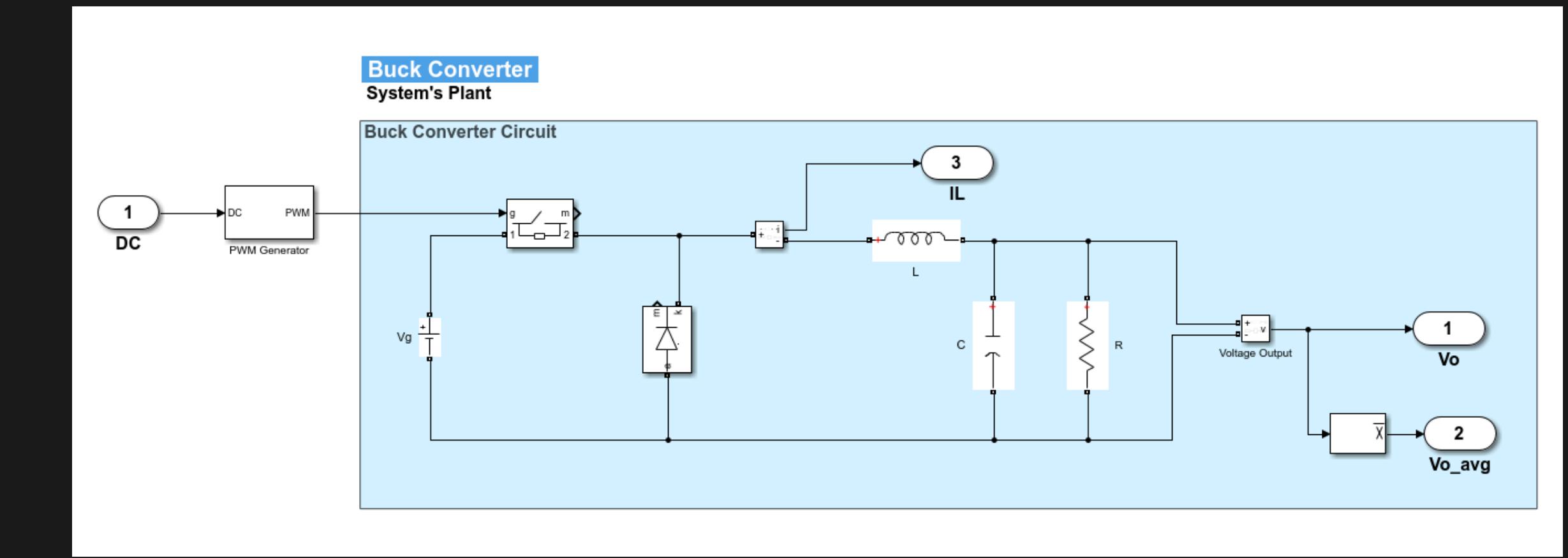
VALORES

$V_g = 250 \text{ V}$
 $L = 2\text{mH}$
 $C = 30 \mu\text{F}$
 $R = 30 \text{ k}\Omega$
 $f_s = 1 \text{ kHz}$

A planta a ser controlada é um conversor buck, um conversor CC-CC abaixador de tensão. Em malha simples, controla-se a tensão na carga (V_o), em malha dupla também controla-se a corrente no indutor (i_L).

CONVERSOR BUCK

CONVERSOR BUCK NO SIMULINK



A cima têm-se o conversor buck no Simulink, sendo possível perceber que o controle é feito a partir do Duty cycle (DC). O chaveamento tem frequência f_s já mostrada anteriormente.

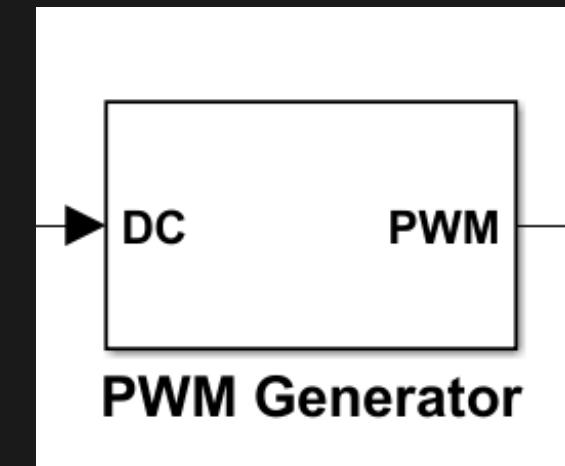
PROJETO DO CONTROLADOR



OBSERVAÇÕES SOBRE A PLANTA

Como dito anteriormente, o sinal de controle é o sinal de duty cycle [valor entre 0 e 1] logo, sinais de controle acima de 1 e abaixo de zero saturam o sistema.

GERADOR DE PWM



SIMULAÇÕES DO SISTEMA



OBSERVAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES

O método de discretização escolhido na configuração do sistema é extremamente relevante ao simular, altera-lo pode fazer a simulação ir mais rápido, porém altera (piora) a saída do sistema.

ATIVIDADE 1

A primeira atividade se baseia em projetar um controlador em malha simples para o conversor Buck.

ATIVIDADE 1

SUMÁRIO

01

MODELO DA PLANTA

02

PROJETO DO CONTROLADOR

07

SIMULAÇÃO DO PROJETO

MODELO DA PLANTA

A modelagem é feita em caixa branca, dado que a função transferência que relaciona a tensão de saída (V_o) e o dutycycle é conhecida.

Ao lado têm-se a função transferência do conversor buck dada a partir dos seus parâmetros, seguida da função de transferência numérica (com os valores dados anteriormente).

FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA (BUCK)

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

FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

$$\frac{4.1667e+09}{(s^2 + 1111s + 1.667e07)}$$

Ao lado, é visto que a planta é tipo 0 e com um par de polos conjugados complexos.

PROJETO DO CONTROLADOR



CONDIÇÕES

1. Erro de regime Permanente (E_{ss}) = 0
2. Tempo de Assentamento (T_s): $1 \text{ ms} < T_s(5\%) < 5 \text{ ms}$

Condições impostas sobre a resposta, dadas na contextualização do problema.

Para erro de regime permanente nulo, (dado que a planta é tipo 0) o controlador precisa ser tipo 1, dito isso, um controlador PIDF (PID + Filtro) é mais que o suficiente.

PROJETO DO CONTROLADOR



1. Erro de regime Permanente (e_{ss}) = 0

Steady State Error (e_{ss}):

$$\Rightarrow R(s) = \frac{1}{s} \text{ (step)}$$

$$\Rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot (R(s) \cdot [1 - FTMF(s)]) = \lim_{s \rightarrow 0} [1 - FTMF(s)]$$

$$PIDF = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d \cdot s}{T_f \cdot s + 1} = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s \cdot (T_f \cdot s + 1)}$$

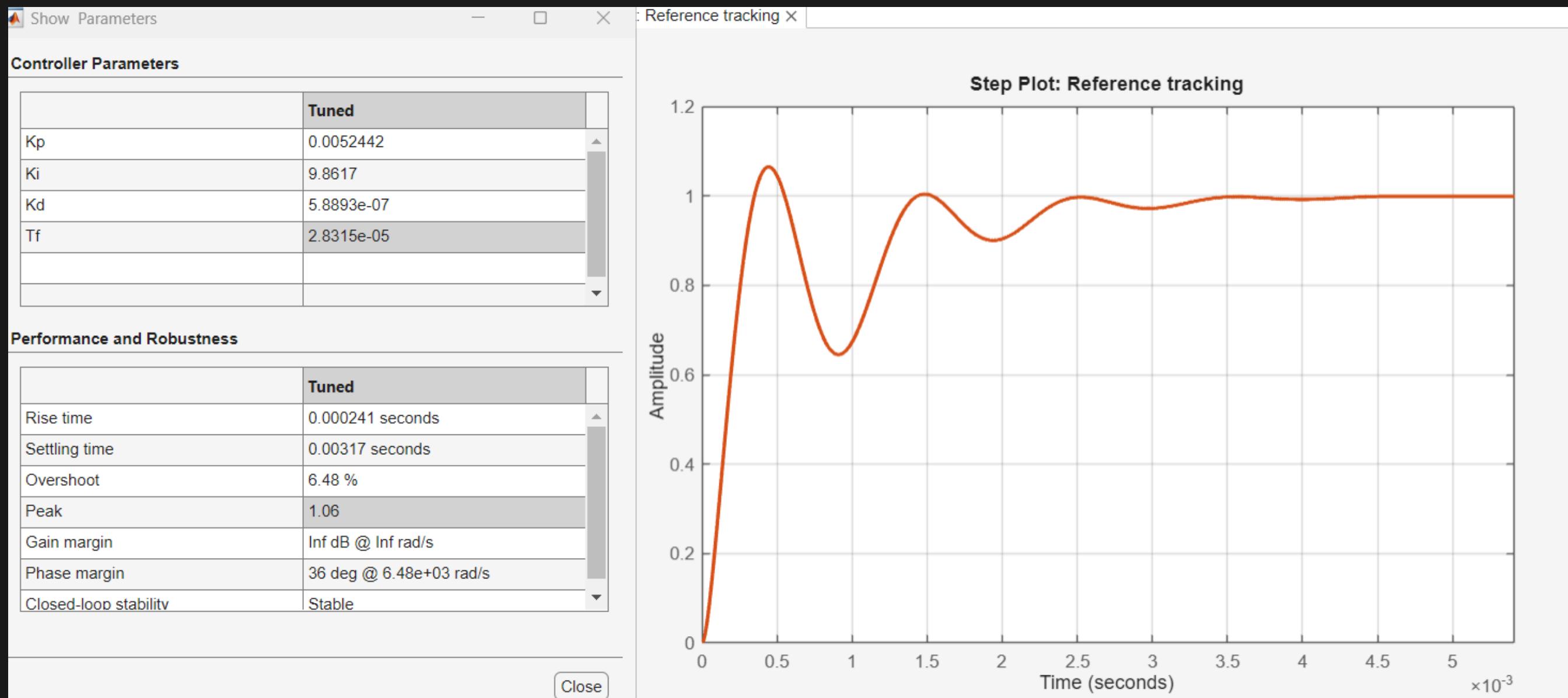
$$FTMF(s) = \frac{PIDF(s) * G_1(s)}{1 + PIDF(s) * G_1(s)} = \frac{(K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i) \cdot G_1(s)}{s \cdot (T_f \cdot s + 1) + (K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i) \cdot G_1(s)}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} FTMF(s) = \frac{(K_i) \cdot G_1(s)}{(K_i) \cdot G_1(s)} = 1 \Rightarrow e_{ss} = 0 \quad \forall K_i \neq 0$$

Dado que o controlador é tipo 1, já se sabe que o erro em regime permanente é zero para entrada degrau, porém ao lado consta a prova matematica.

PROJETO DO CONTROLADOR

PID TUNNER



O controlador em si foi feito a partir do PID tunner, seguido por um ajuste fino.

PROJETO DO CONTROLADOR

A sintonia fina foi simples:

- o ganho derivativo foi diminuido enquanto seu filtro foi aumentado (dado que o degrau de 6V gerava saturação no controlador).
- Kp e Ki foram levemente aumentados para aumentar a velocidade

VALOR DO KP

0.0075

VALOR DO KI

14

VALOR DO TF

8.18E-06

VALOR DO KD

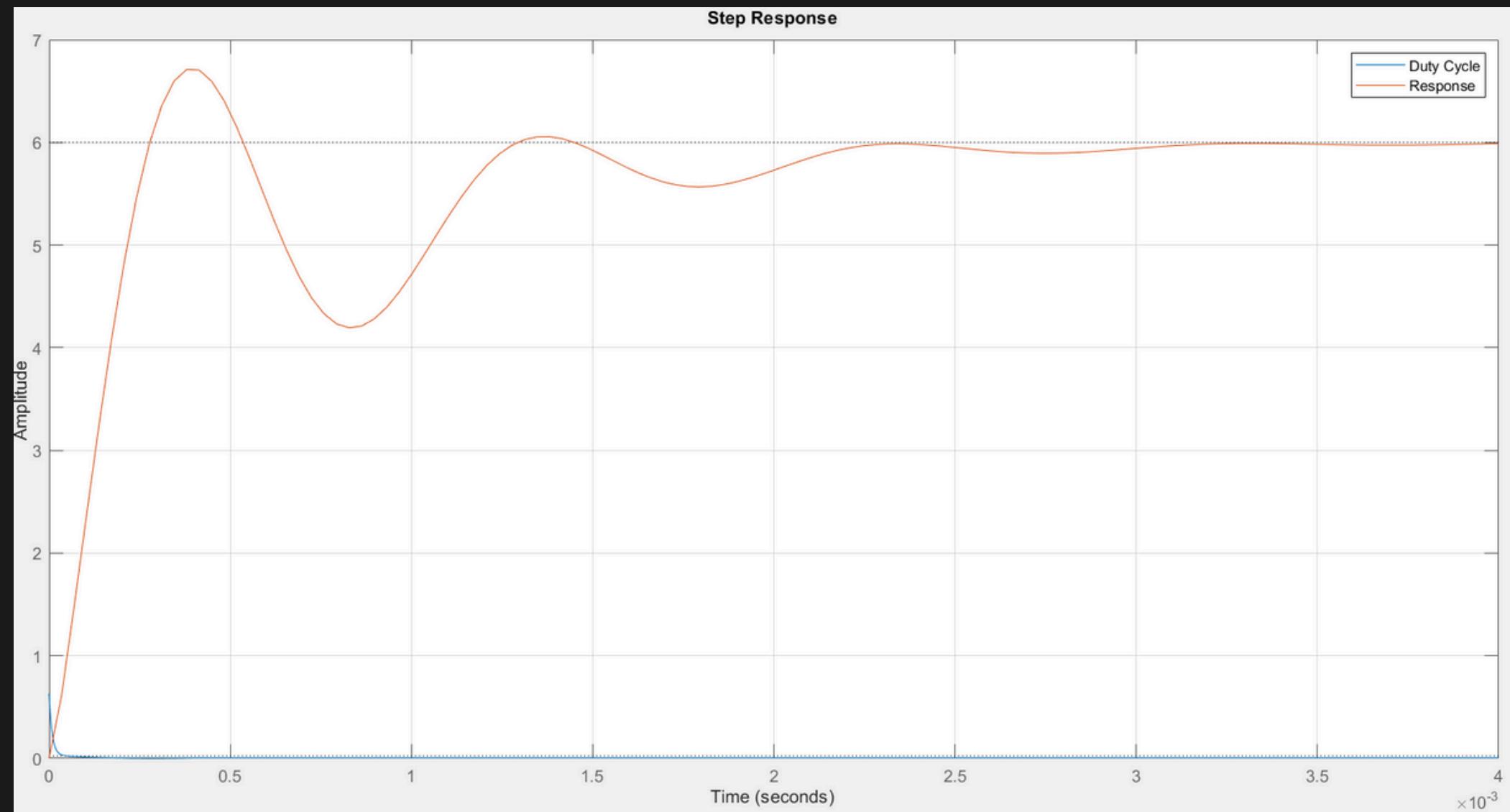
0.8E-06

CONTROLADOR

$$\text{PIDF} = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d \cdot s}{T_f \cdot s + 1}$$

PROJETO DO CONTROLADOR

RESPOSTA AO DEGRAU (NO MATLAB)



Aqui têm-se a
resposta do modelo

DADOS

$$M_p = 11,82\%$$

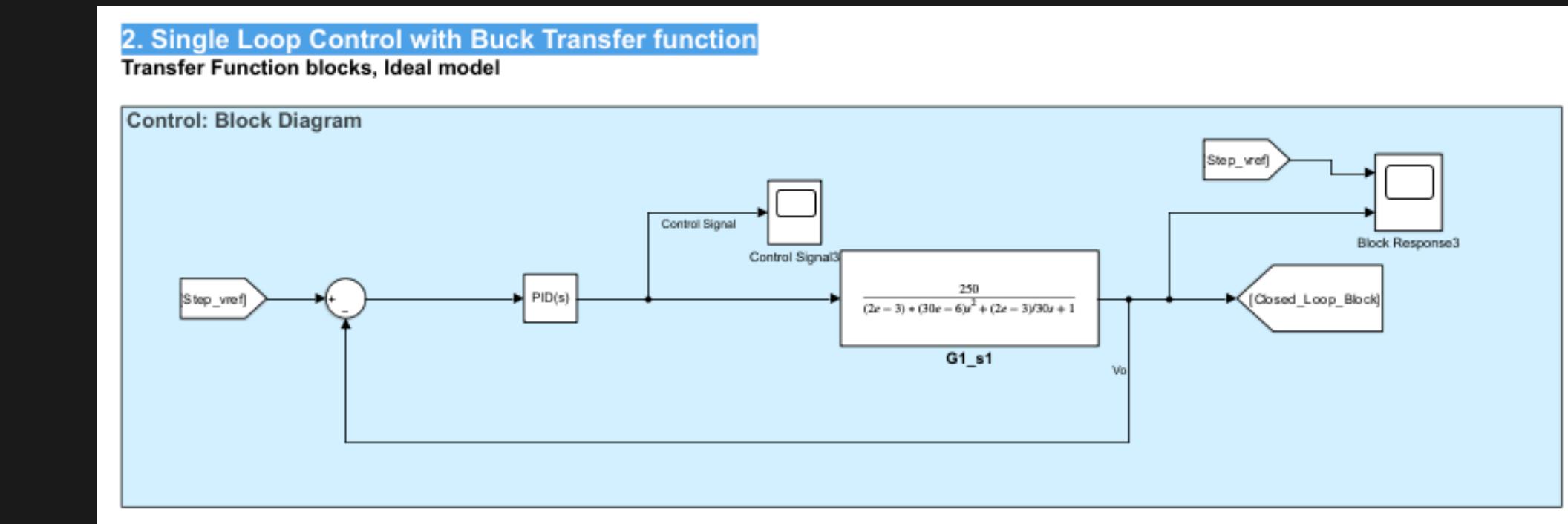
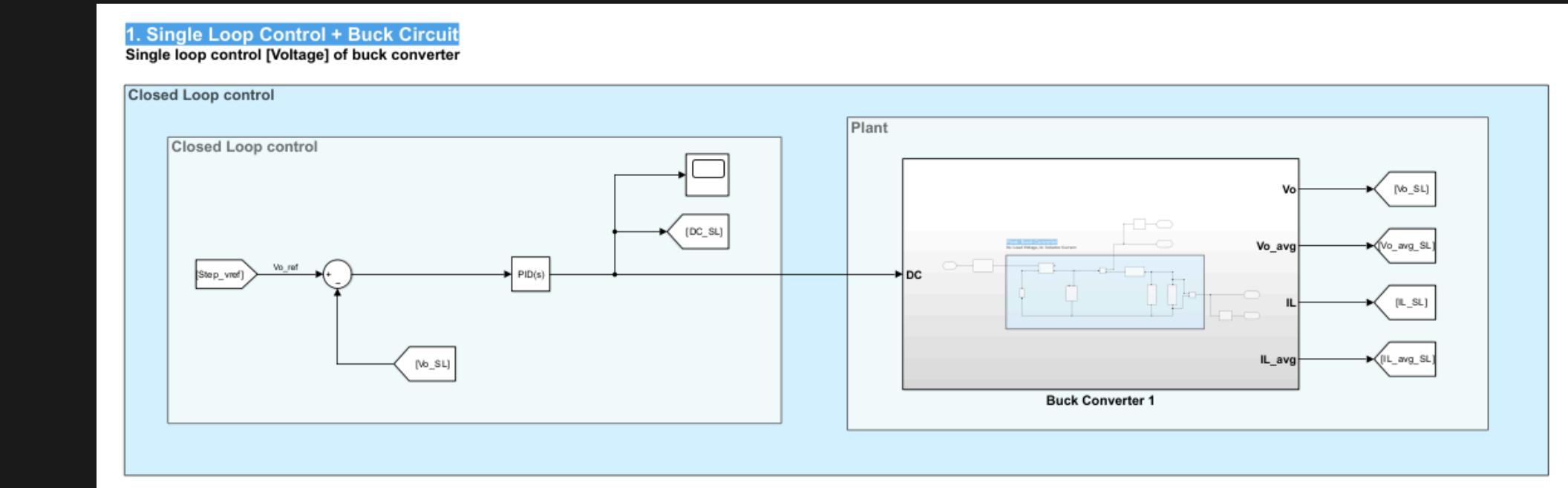
$$T_s = 1,97 \text{ ms}$$

$$E_{ss} = 0$$

SIMULAÇÃO DO PROJETO

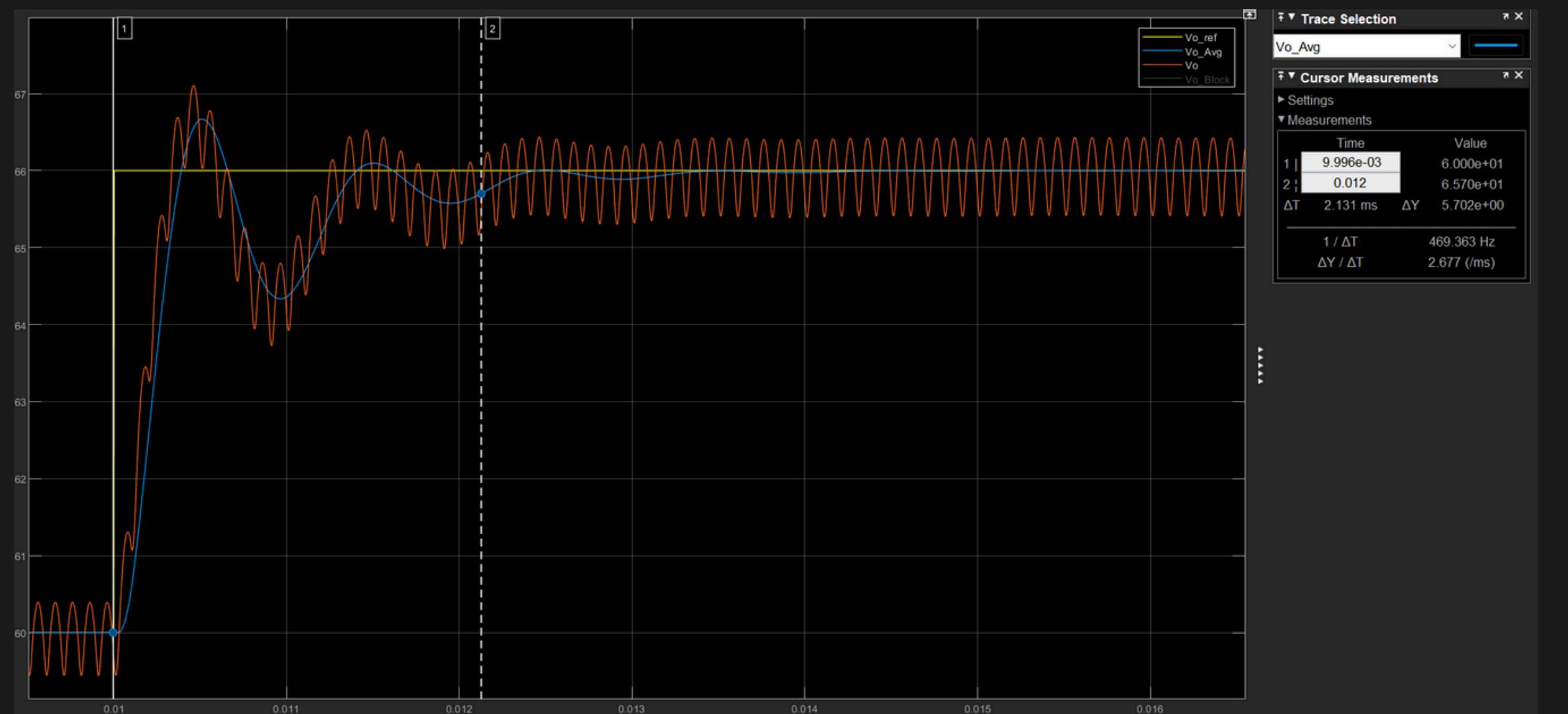
MALHA DE CONTROLE NO SIMULINK

Por fim, o circuito foi montado no Simulink (tal qual visto ao lado), juntamente ao sistema com blocos, para comparação.



SIMULAÇÃO DO PROJETO

RESPOSTA AO DEGRAU (SIMULINK)



DADOS

$M_p = 11,6\%$

$T_s = 2,131 \text{ ms}$

$E_{ss} = 0$

ATIVIDADE 2

Projeto de um controlador em malha dupla para o controle de tensão e corrente de um conversor Buck.

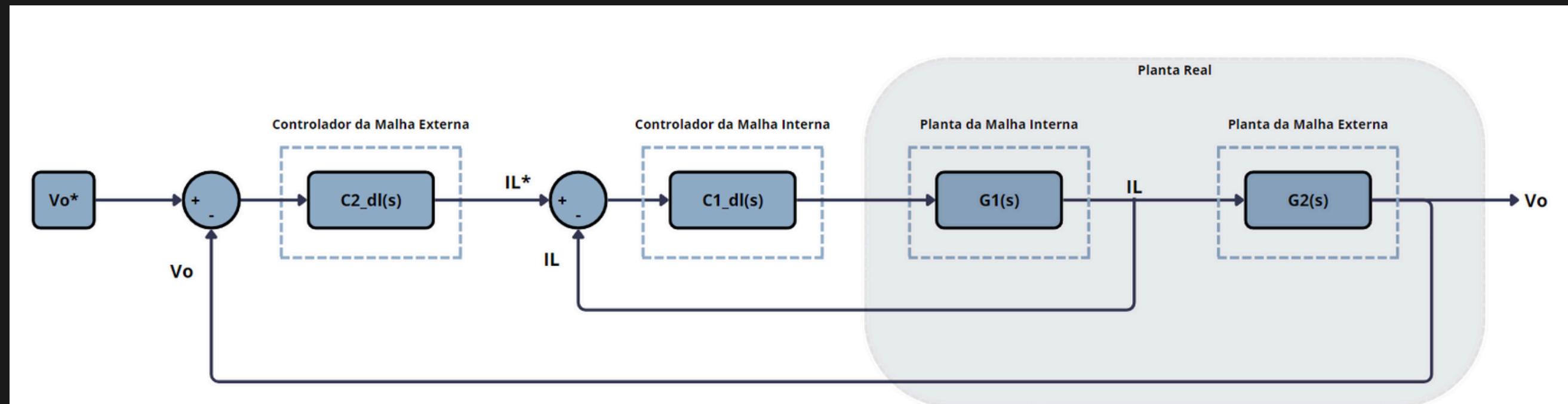
ATIVIDADE 1

SUMÁRIO

- 01** CONTROLE EM CASCATA
- 03** MODELO DA PLANTA
- 04** PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO
- 09** PROJETO DO CONTROLADOR INTERNO
- 11** SIMULAÇÃO DO PROJETO (SIMULINK)
- 14** COMPARAÇÃO DOS CONTROLES

CONTROLE EM CASCATA

DIAGRAMA DO CONTROLE EM CASCATA

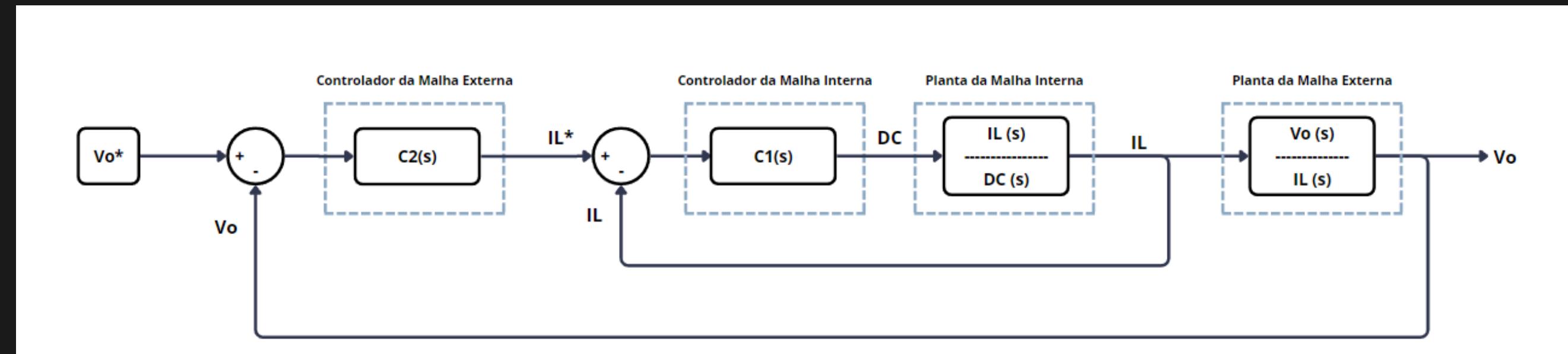


O controle em cascata se baseia em criar 2 (ou até mais) malhas, uma interna e outra externa, que possuem controladores distintos para variáveis distintas, mas que se influenciam e atuam em 1 único atuador.

CONTROLE EM CASCATA

A teoria por trás é que se a malha interna for suficientemente mais rápida que a externa (geralmente a partir de 100x mais) sua dinâmica pode ser ignorada, não afetando o controle da malha externa.

DIAGRAMA DO CONTROLE DO CONVERSOR BUCK



No diagrama a cima, a malha externa é o controle de tensão e a interna é o controle de corrente, sendo valido notar que mesmo que sejam 2 malhas, só tem 1 sinal de controle indo para o Buck, o duty cycle (DC).

MODELO DA PLANTA

A modelagem continua sendo feito em caixa branca e os parâmetros continuam com os mesmos valores.

Para a malha interna (controle de corrente) a planta relaciona corrente e duty cycle (dado que sua saída é o atuador).

PLANTA (MALHA INTERNA)

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

Já para a malha Externa (controle de tensão) a planta relaciona a tensão de saída e corrente. (ela é quem recebe o sinal de realimentação).

PLANTA (MALHA EXTERNA)

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

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO



CONDIÇÕES

1. Erro de regime Permanente (E_{ss}) = 0
2. Tempo de Assentamento (T_s): $1 \text{ ms} < T_s(5\%) < 5 \text{ ms}$
3. Máximo Sobressinal ($M_p\%$) = 0%

Condições impostas sobre o controle de tensão, dadas na contextualização do problema.

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

Para erro de regime permanente nulo, (dado que a planta é tipo 0) o controlador precisa ser tipo 1.

Dito isso, um controlador PI é mais que o suficiente. A motivação principal por trás da escolha é a facilidade de fazer um ajuste fino de um PI, utilizando PID tunner para o chute inicial.

PLANTA (MALHA EXTERNA)

$$\frac{30}{0.0009s + 1}$$

CONTROLADOR

$$PI = K_p + \frac{K_i}{s} .$$

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO



1. Erro de regime Permanente (e_{ss}) = 0

Steady State Error (e_{ss}):

$$\Rightarrow R(s) = \frac{1}{s} \text{ (step)}$$

$$\Rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot (R(s) \cdot [1 - FTMF(s)]) = \lim_{s \rightarrow 0} [1 - FTMF(s)]$$

$$\Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} FTMF(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\frac{(K_p \cdot s + K_i)}{s} \cdot G_p(s)}{1 + \frac{(K_p \cdot s + K_i)}{s} \cdot G_p(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(K_p \cdot s + K_i) \cdot G_p(s)}{s + (K_p \cdot s + K_i) \cdot G_p(s)} = 1$$

Logo,

$$e_{ss} = 0, \forall K_i \neq 0$$

Dado que o controlador é tipo 1, ja se sabe que o erro em regime permanente é zero para entrada degrau, tendo ao lado a prova matemática do fato.

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

A sintonia fina:

- Kp e Ki foram levemente aumentados para acelerar resposta

VALOR DO KP

0.04

VALOR DO KI

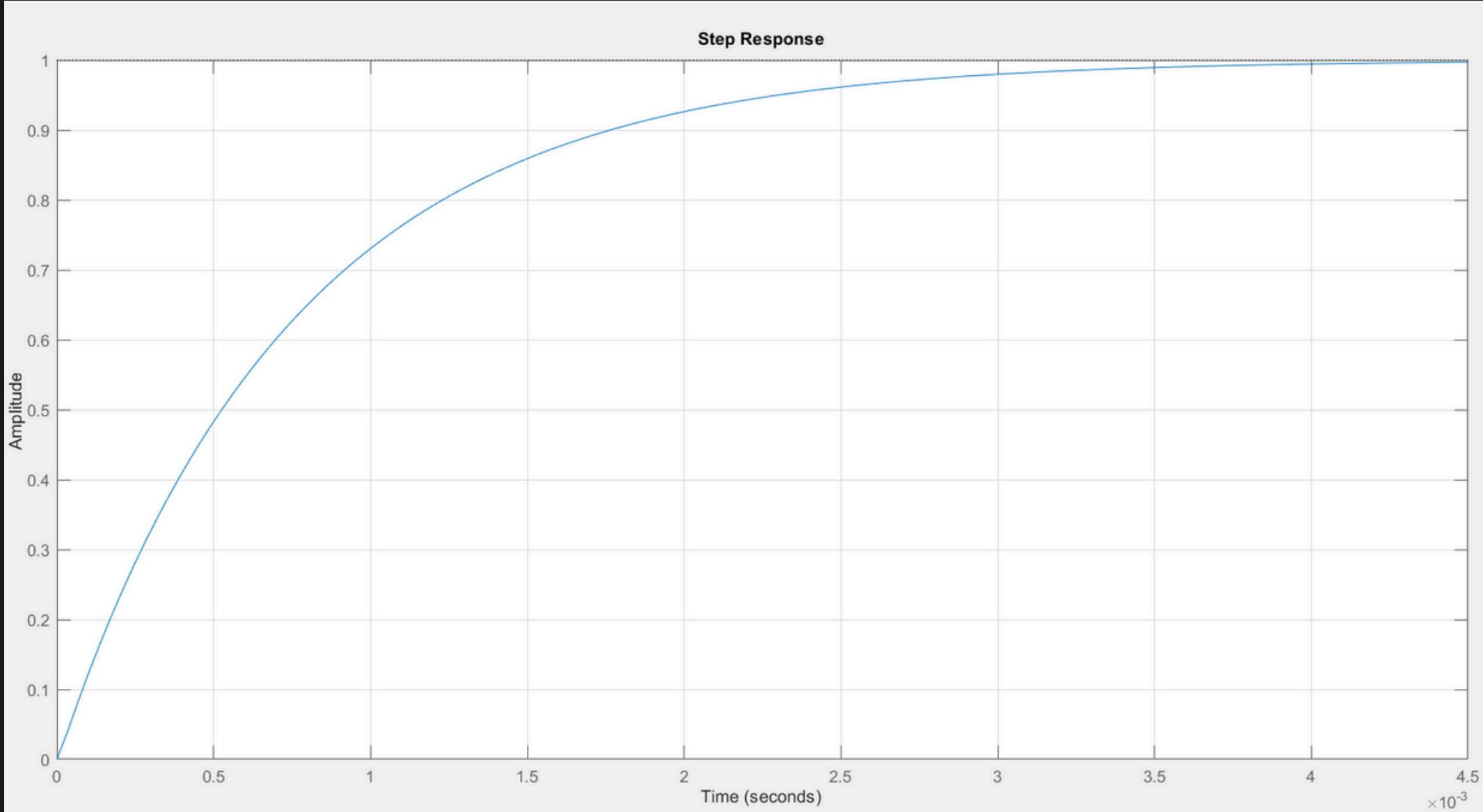
43.6

CONTROLADOR

$$\frac{0.04s + 43.6}{s}$$

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

RESPOSTA AO DEGRAU (NO MATLAB)
(CONTROLE DE TENSÃO)



Aqui têm-se a resposta
do modelo ideal

DADOS

$M_p = 0\%$

$T_s = 2,3 \text{ ms}$

$E_{ss} = 0$

PROJETO DO CONTROLADOR INTERNO

De maneira semelhante, um controlador PI foi escolhido para a malha interna, agora focando apenas no tempo de assentamento ser 100x menor que projetado anteriormente.

VALOR DO KP

1,8

VALOR DO KI

10K

PLANTA (MALHA INTERNA)

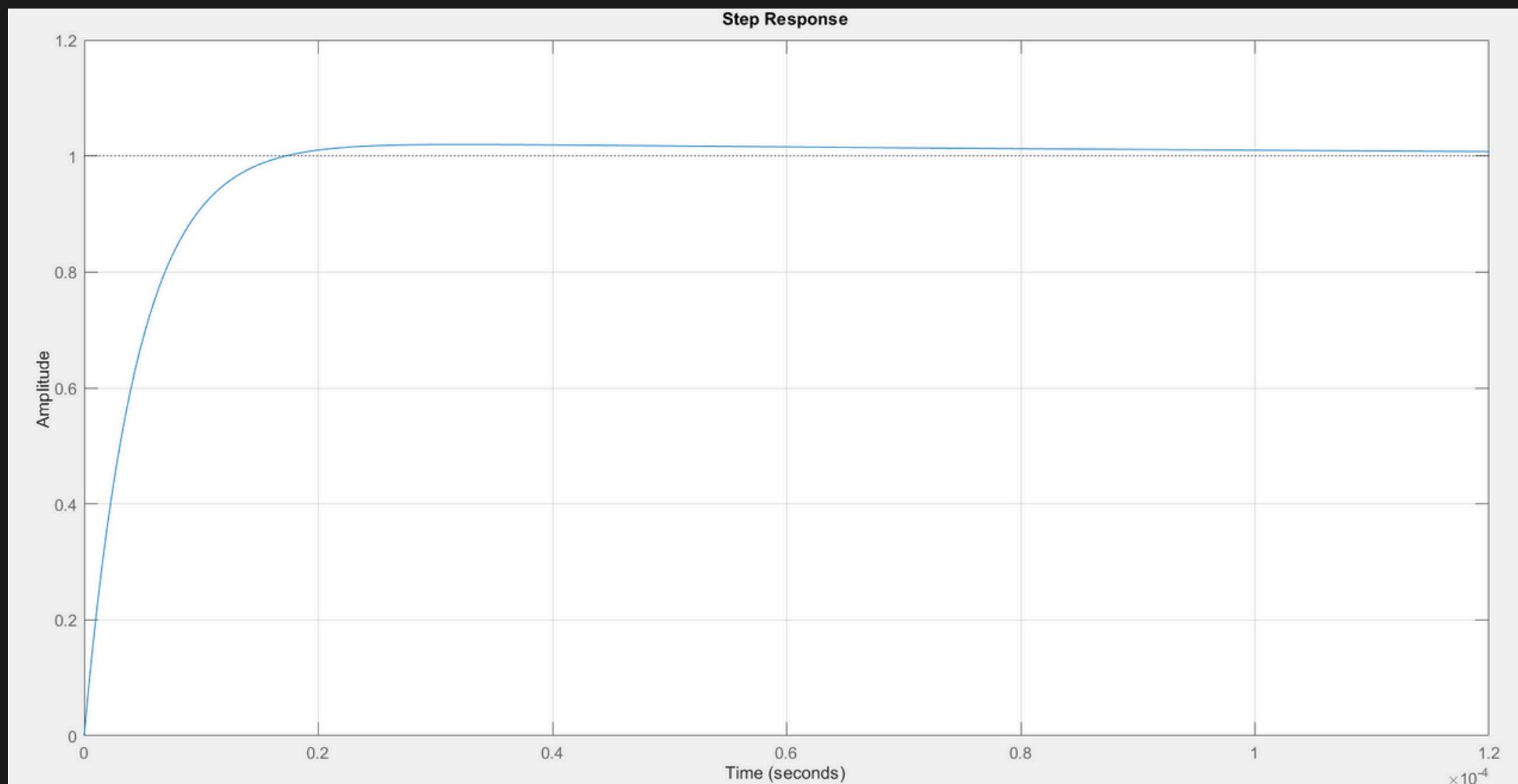
$$\frac{0.0075s + 8.3333}{6e - 08s^2 + 6.6667e - 05s + 1}$$

CONTROLADOR

$$\frac{1.8s + 10e3}{s}$$

PROJETO DO CONTROLADOR INTERNO

RESPOSTA AO DEGRAU (NO MATLAB)
(CONTROLE DE CORRENTE)



Aqui têm-se a resposta
do modelo ideal

DADOS

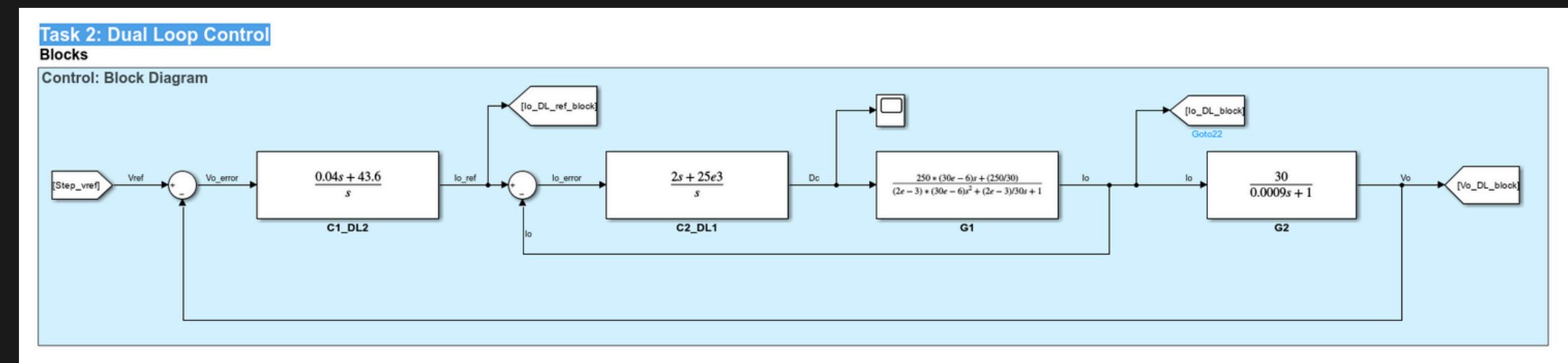
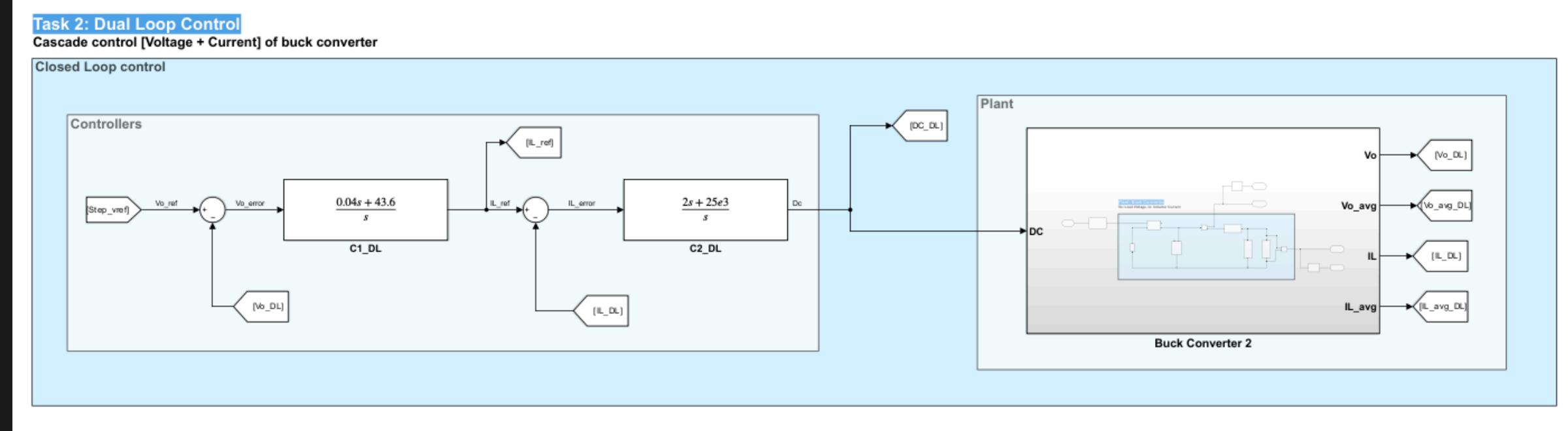
$M_p = 1,96\%$
 $T_s = 11,95 \mu s$
 $E_{ss} = 0$

*192x mais rápido
que a malha
externa

SIMULAÇÃO DO PROJETO

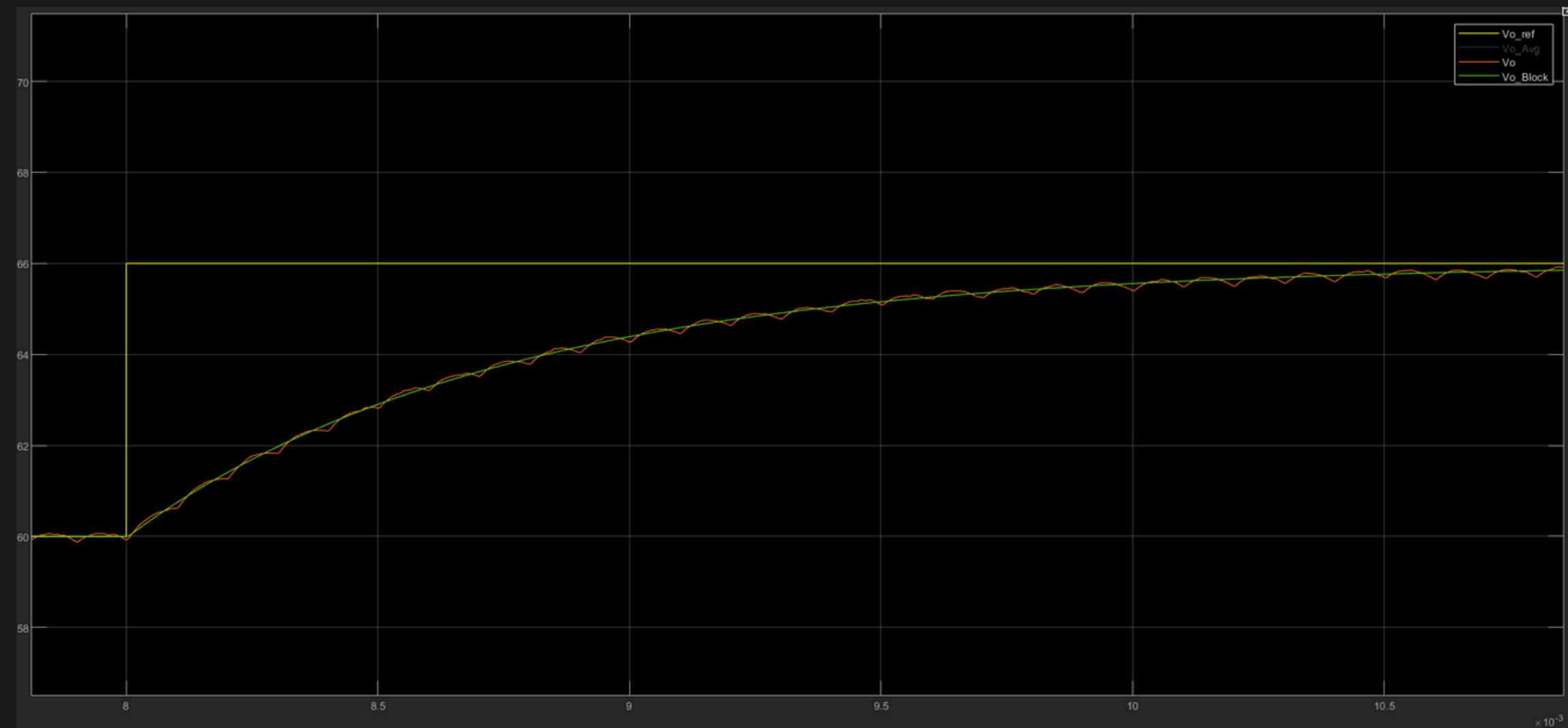
Por fim, o circuito foi montado no Simulink (tal qual visto ao lado), junto ao sistema com blocos, para comparação.

MALHA DE CONTROLE NO SIMULINK



SIMULAÇÃO DO PROJETO

RESPOSTA AO DEGRAU (SIMULINK) (TENSÃO)



DADOS

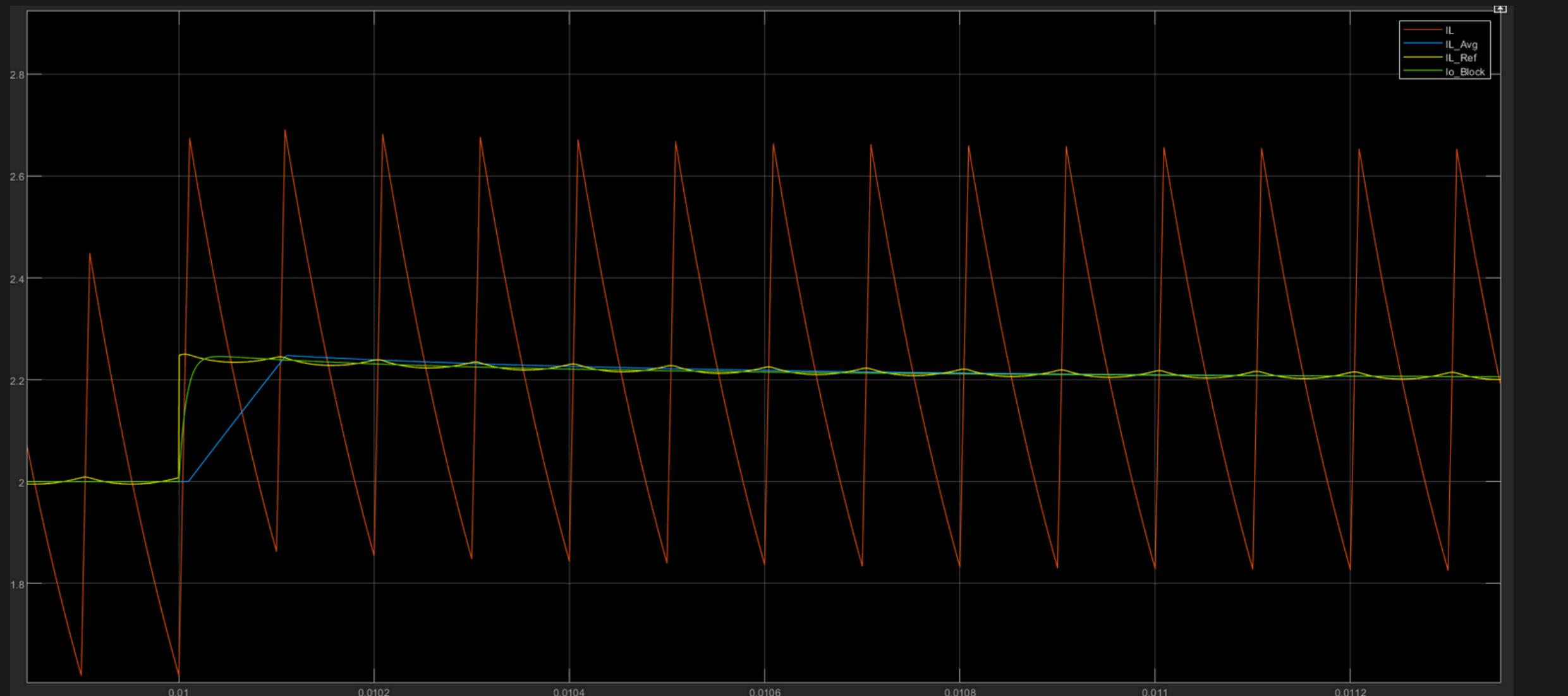
$$M_p = 0 \%$$

$$T_s = 2,3 \text{ ms}$$

$$E_{ss} = 0$$

SIMULAÇÃO DO PROJETO

RESPOSTA AO DEGRAU (SIMULINK) (CORRENTE)



têm-se um controle de corrente extremamente rápido (a media tem um atraso, então parece mais lenta)

COMPARAÇÃO DE PROJETOS



OBSERVAÇÕES SOBRE O CONTROLE

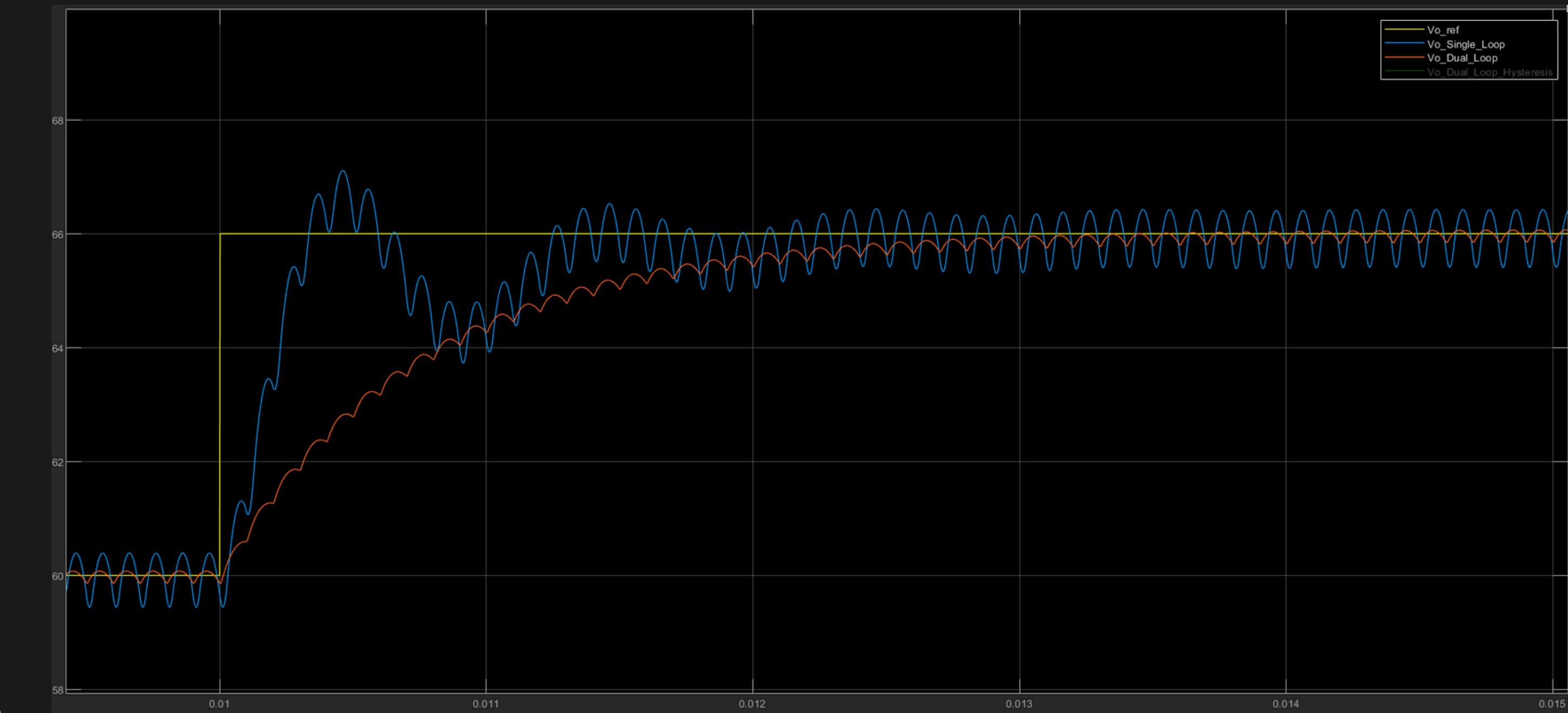
A seguir, têm-se a comparação entre os sinais de tensão e corrente quando utilizados controles em malha simples (atividade anterior) e a malha dupla (atual).

Dado que o valor medio tem um atraso, foi decidido comparar usando o valor real (que varia em certo range).

O degrau de 60 a 66 foi dado no tempo 0.1s.

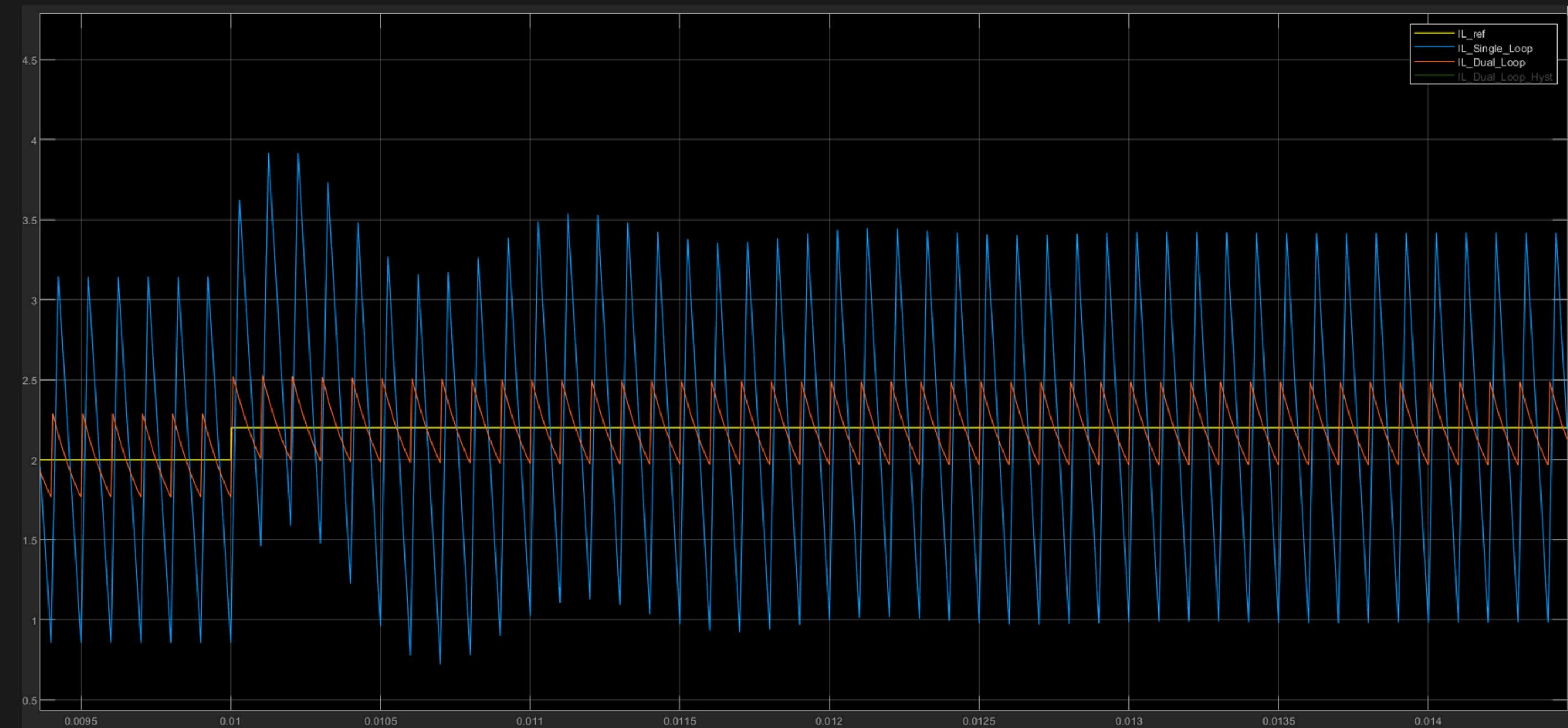
COMPARAÇÃO DE PROJETOS

COMPARAÇÃO ENTRE MALHA SIMPLES E DUPLA: (MEDIÇÃO DE TENSÃO)



COMPARAÇÃO DE PROJETOS

COMPARAÇÃO ENTRE MALHA SIMPLES E DUPLA: (MEDIÇÃO DE CORRENTE)



ATIVIDADE 3

Projeto de um controlador em malha dupla para o controle de tensão e corrente de um conversor Buck, agora acelerando ainda mais a resposta.

ATIVIDADE 3

SUMÁRIO

01

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

04

PROJETO DO CONTROLADOR INTERNO

05

SIMULAÇÃO DO PROJETO

09

COMPARAÇÃO DE PROJETOS

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO



CONDIÇÕES

1. **Tempo de Assentamento (T_s):** $0.1 \text{ ms} < T_s(5\%) < 1 \text{ ms}$
2. **Máximo Sobressinal ($M_p\%$) = 0\%**

Condições impostas sobre o controle de tensão, dadas na contextualização do problema.

A parte sobre modelagem foi pulada, dado que a planta continua sendo a mesma.

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

Tal qual feito anteriormente, foi escolhido um controlador PI, onde o mesmo foi projetado no PID tuner (chute inicial) e depois feito um ajuste fino manual.

A sintonia fina foi igual ao anterior:

- K_p e K_i foram levemente aumentados para aumentar a velocidade.

PLANTA (MALHA EXTERNA)

$$\frac{30}{0.0009s + 1}$$

CONTROLADOR

$$\frac{0.188s + 208}{s}$$

VALOR DO K_P

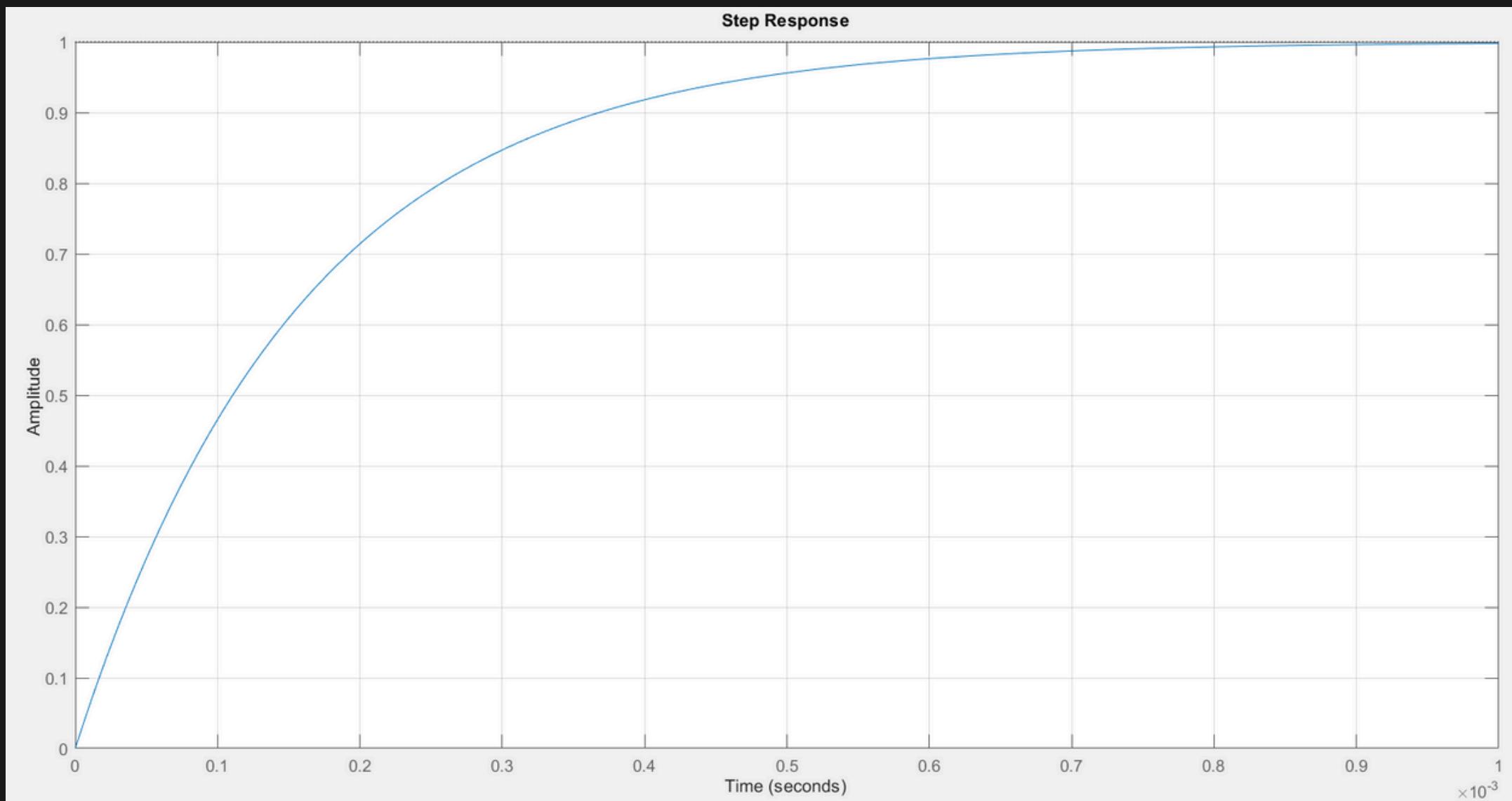
0.188

VALOR DO K_I

208

PROJETO DO CONTROLADOR EXTERNO

RESPOSTA AO DEGRAU (NO MATLAB)
(CONTROLE DE TENSÃO)



Aqui têm-se a resposta
do modelo ideal

DADOS

$$M_p = 0\%$$

$$T_s = 0,48 \text{ ms}$$

$$E_{ss} = 0$$

PROJETO DO CONTROLADOR INTERNO

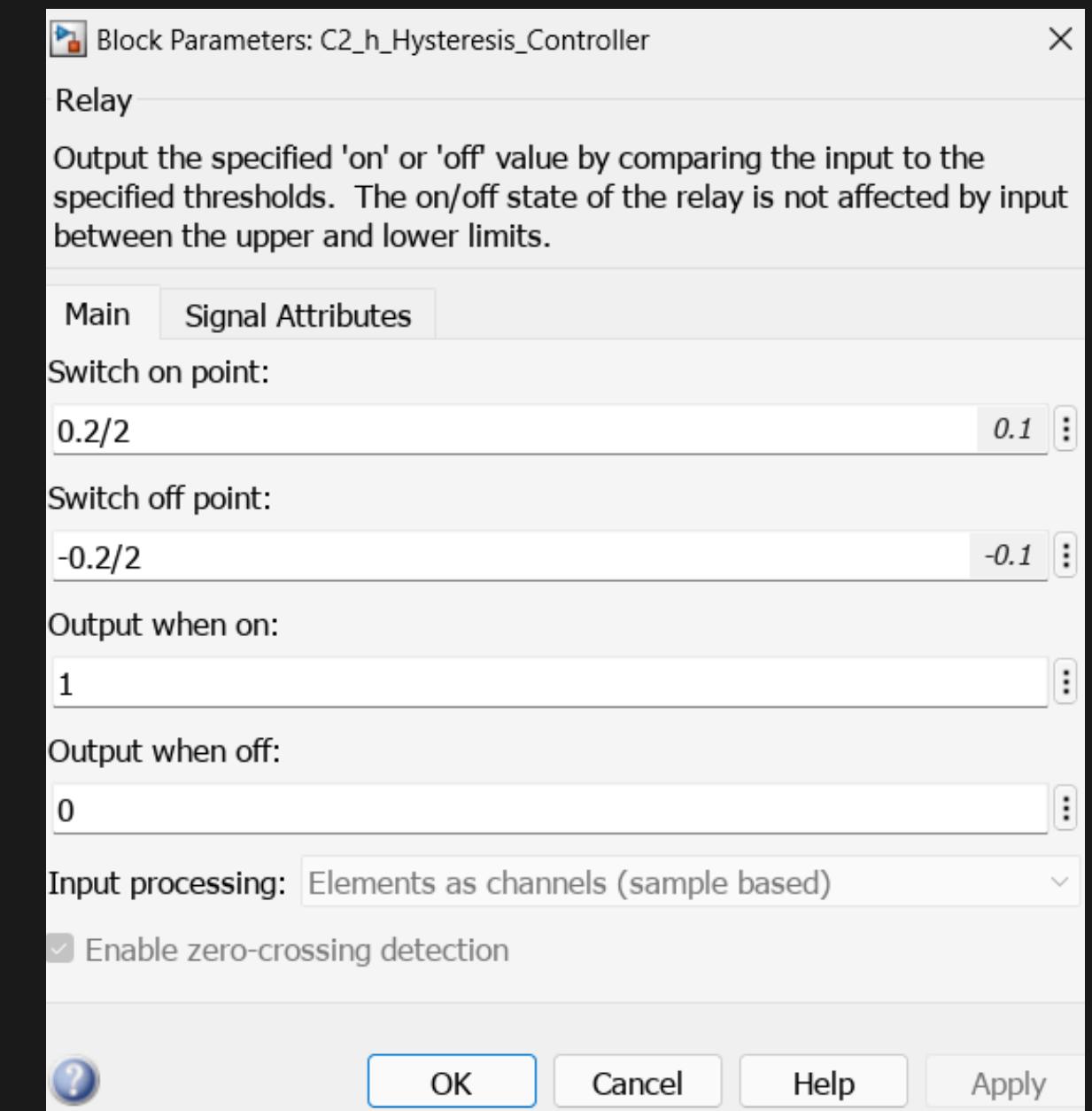
Para o projeto do controlador interno, foi escolhido o controle por histerese (Dado que ele é extremamente rápido).

A banda de histerese foi escolhida como 10% do valor de corrente antes do degrau.

BANDA
0.2 A



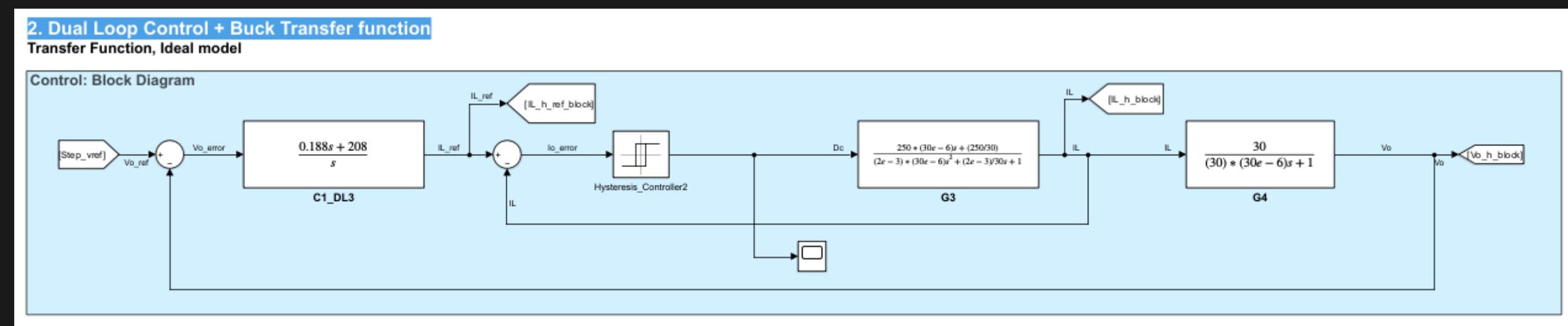
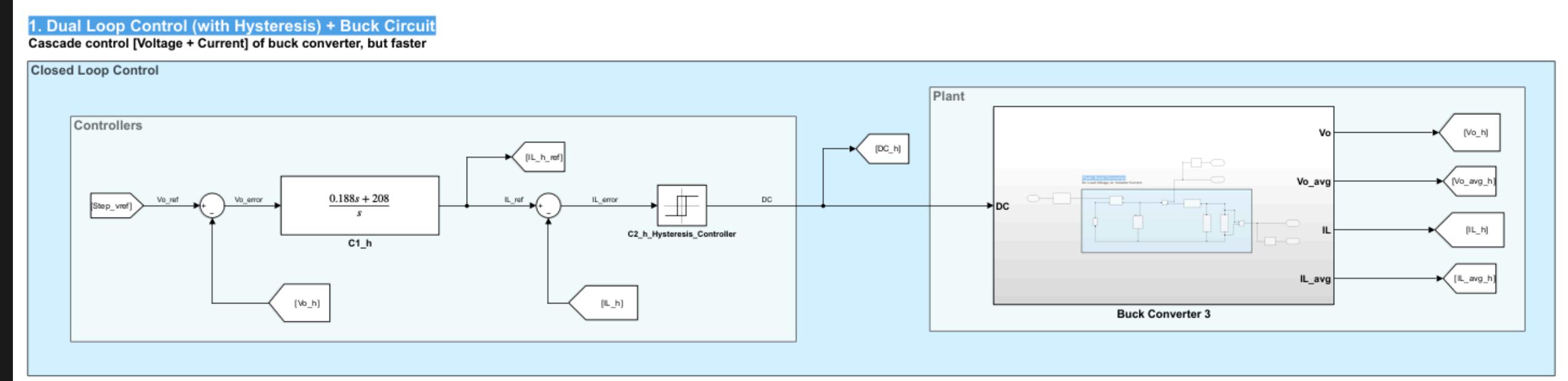
CONFIGURAÇÃO DO BLOCO



SIMULAÇÃO DO PROJETO

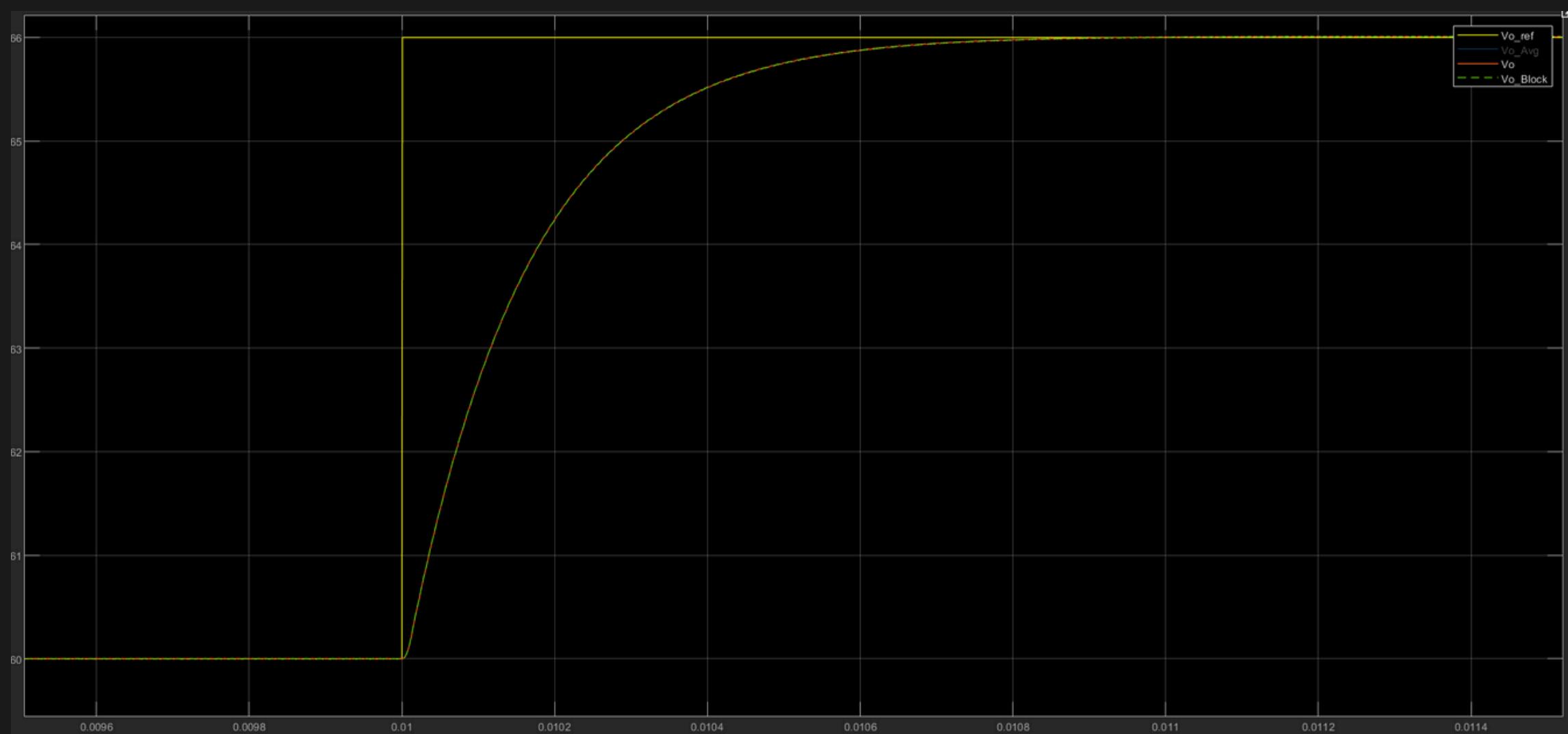
Por fim, o circuito foi montado no Simulink (tal qual visto ao lado), junto ao sistema com blocos, para comparação.

MALHA DE CONTROLE NO SIMULINK



SIMULAÇÃO DO PROJETO

RESPOSTA AO DEGRAU (TENSÃO)



DADOS

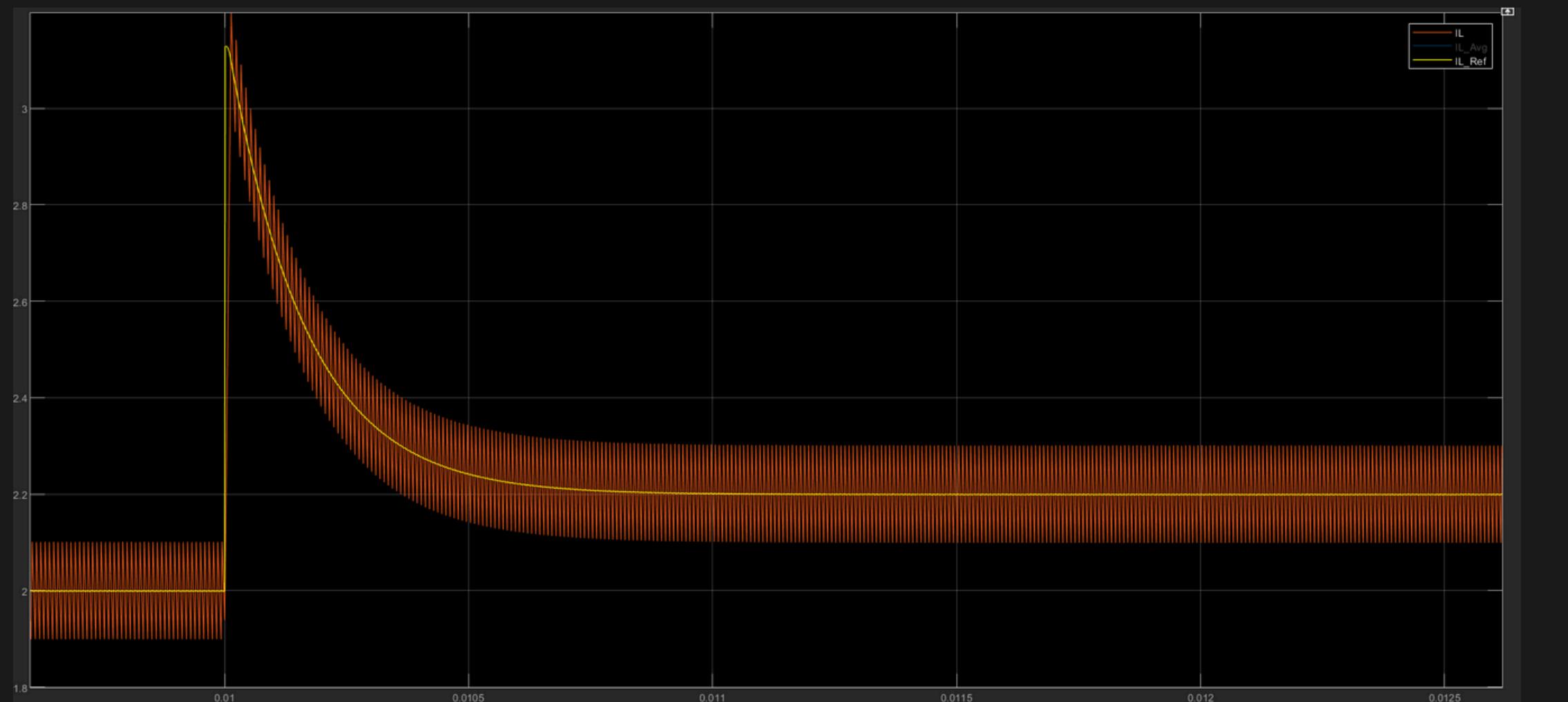
$$M_p = 0 \%$$

$$T_s = 2,3 \text{ ms}$$

$$E_{ss} = 0$$

SIMULAÇÃO DO PROJETO

RESPOSTA AO DEGRAU
(CORRENTE)



DADOS

$$h = 0.2 \text{ A}$$

$$IL(\text{superior}) = 2.3 \text{ A}$$

$$IL(\text{Inferior}) = 1.3 \text{ A}$$

SIMULAÇÃO DO PROJETO



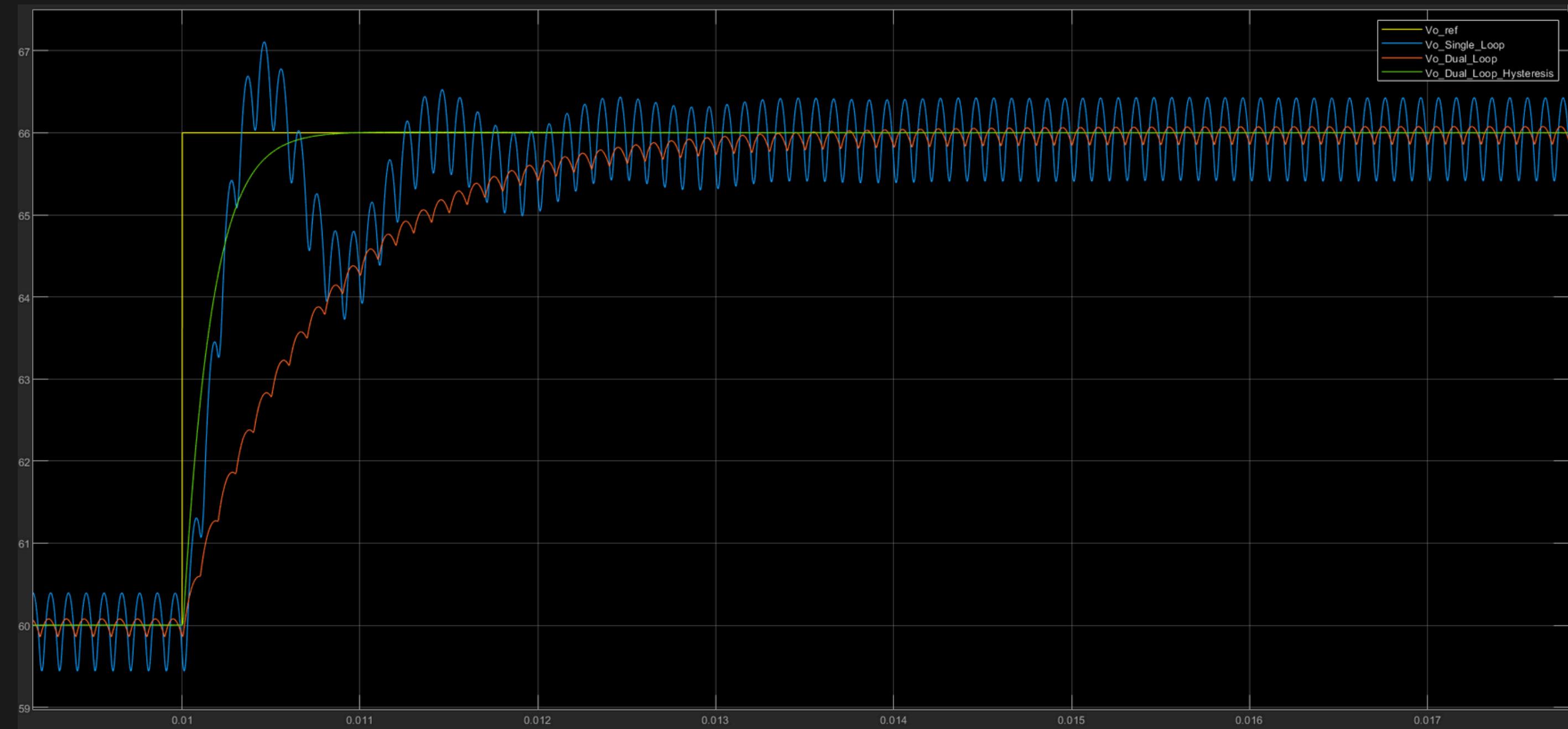
OBSERVAÇÕES

O modelo ideal (com blocos de função transferência) teve resposta igual ao do circuito do simulink, o que indica que o mesmo foi bem projetado.

A seguir, têm-se a comparação entre os sinais de tensão e corrente dos 3 sistemas de controle projetados.

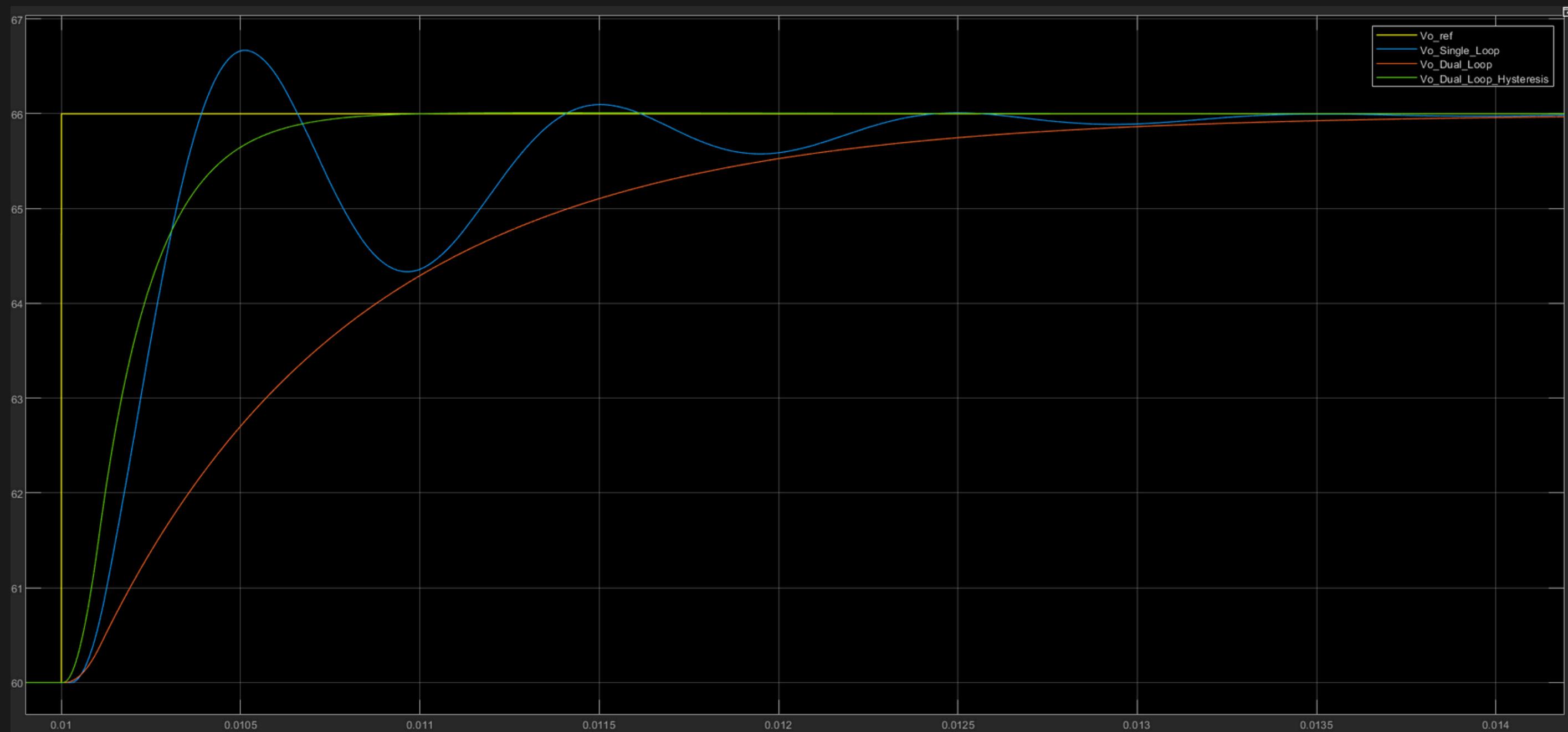
COMPARAÇÃO DE PROJETOS

COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS: (MEDIÇÃO DE TENSÃO)



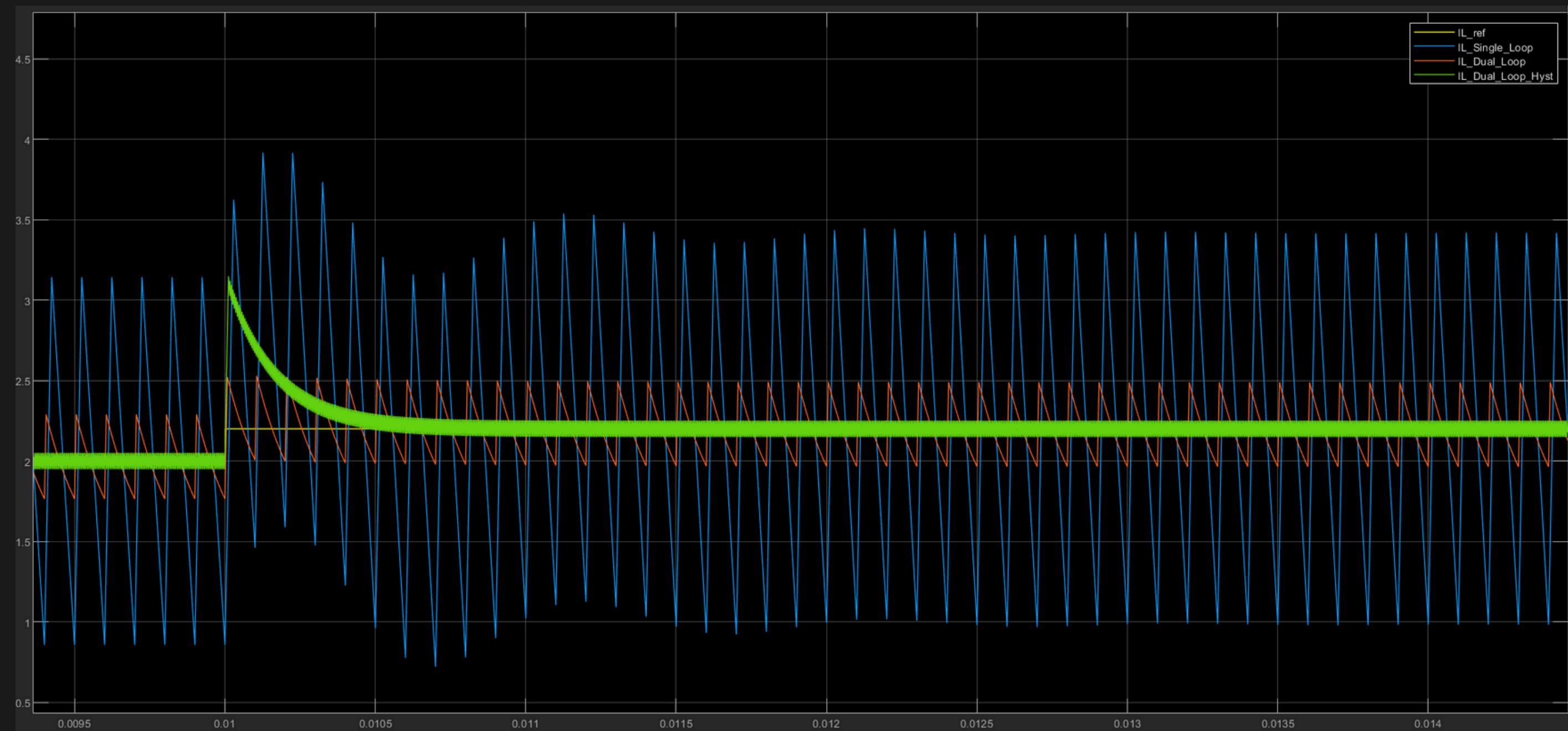
COMPARAÇÃO DE PROJETOS

COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS:
(MEDIÇÃO DE TENSÃO [MEDIA])



COMPARAÇÃO DE PROJETOS

COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS: (MEDIÇÃO DE CORRENTE)



PERGUNTAS?

Constató:

Lucasgabrielf00@gmail.com

*Material de estudos para disciplina
Laboratório de Engenharia de Controle*

