

	<b>Universidade Federal de Pernambuco</b> <b>Departamento de Engenharia Elétrica</b> <b>Laboratório de Eletrônica de Potência</b>	
	<b>Relatório do Projeto Final</b>	
	Aluno:	LUCAS GABRIEL FERREIRA LIMA e RAMATIS BARROS MADUREIRA FERREIRA
	Bancada:	Data: 27/03/2024

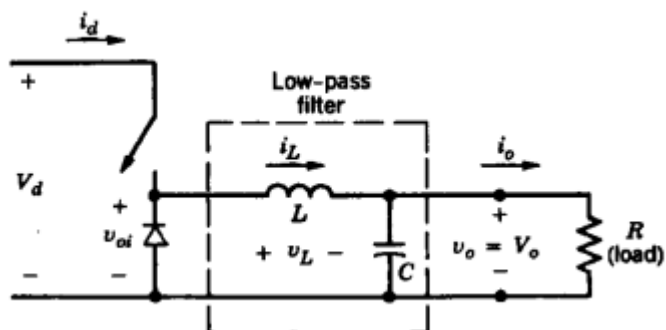
## 1) Objetivos Gerais

Projetar e validar o controle de tensão em malha fechada de um conversor buck, cujos parâmetros estão expostos na tabela 1, seguidos pelo seu circuito, na figura 1:

**Tabela 1: Parâmetros do conversor Buck**

Parâmetro do conversor	Valor
Tensão de Entrada ( $V_d$ )	$36\sqrt{2}$ V
Resistência da carga ( $R$ )	$22\ \Omega$
Indutância do filtro ( $L$ )	1 mH
Capacitância do filtro ( $C$ )	$22\ \mu\text{F}$
Frequência de chaveamento ( $f_s$ )	12 kHz

**Figura 1: Circuito do Conversor Buck**



## 2) Parte 1: Modelagem do modulador, da carga e do sensor em Laplace

### 2.1) Objetivos

Modelar o modulador (atraso do pwm ), a carga (relação entre Duty Cycle e tensão Vo) e o sensor (realimentação) em laplace.

### 2.2) Metodologia

Usando Conhecimentos teóricos de controle e eletrônica de potência, foi possível calcular as equações a partir dos valores da tabela 1 e o circuito da figura 1.

### 2.3) Resultados

Para a modelagem do modulator, foi usada a aproximação de Padé de 1ª ordem:

$$T_d(s) = e^{-T_d s} \cong \frac{1 - sT_d/2}{1 + sT_d/2} \quad (1)$$

Onde:

$$T_d = 0.5 * f_s \quad (2)$$

Para a modelagem da carga, primeiro é necessário Modelar a função transferência que relaciona Voi e Vo (tensões antes e depois do filtro passa baixa, tal qual visto na figura 1) . Para tanto, basta utilizar um divisor de tensão:

$$Vo(s) = Voi(s) \cdot \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (\text{Equação 3})$$

Tendo a relação entre Vo e Voi, basta relacioná-la com a equação entre Voi e Vd:

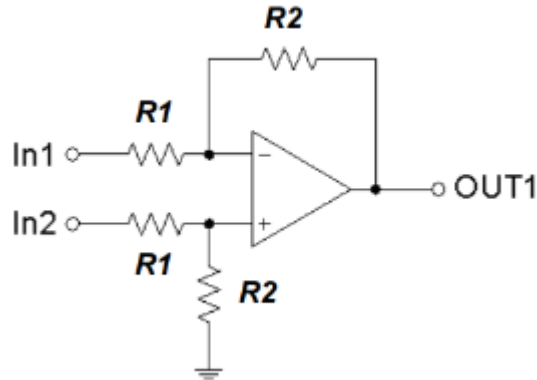
$$Voi(s) = Vd \cdot D(s) \quad (\text{Equação 4})$$

Logo, ao juntar as equações 3 e 4 tem-se a função transferência que modela a tensão carga, chamada de Gp:

$$Gp(s) = \frac{Vo(s)}{D(s)} = \frac{Vd}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (\text{Equação 5})$$

Para o Sensor (realimentação) a modelagem foi simples, usando a seguinte função transferência:

**Figura 2: Amplificador diferenciador (medidor da tensão Vo)**



Onde tem-se abaixo a função transferência do diferenciador que serve como sensor do sistema.

$$H(s) = \frac{R2}{R1} (In2 - In1) \quad (6)$$

O ganho do sensor, tal como os valores de R2 e R1 foram expostos na tabela abaixo:

**Tabela 2: Modelagem do sensor de realimentação**

Parâmetro do Sensor	Valor
Ganho estático	0.1
R1	22 kΩ
R2	2.2 kΩ

## 2.5) Conclusão

Usando conhecimentos teóricos de eletrônica de potência e eletrônica analógica, foi possível modelar as equações sem grandes dificuldades.

### 3) Parte 2: Projeto do Controlador de Tensão em Laplace

#### 3.1) Objetivos

Projetar o controlador de tensão em laplace do conversor buck, para que o mesmo atenda os requisitos de projeto da tabela 2, onde o item tempo de acomodação foi de livre escolha (contanto que fosse em ms)

**Tabela 3: Parâmetros de projeto do Controlador**

Parâmetro do Controlador	Faixa de valores
Tempo de acomodação [ $T_s$ (2%)]	Faixa de ms
Máximo sobressinal Percentual ( $M_p\%$ )	Menor que 5%
Erro estacionário (Degrau) ( $E_{ss}$ )	0

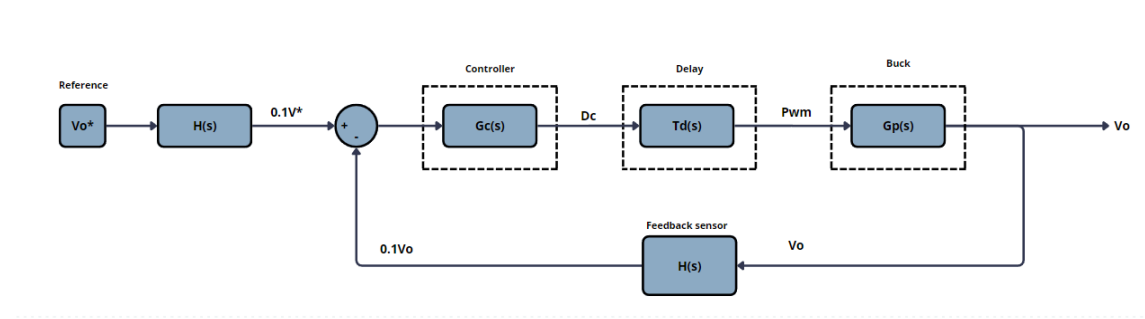
#### 3.2) Metodologia

Através do *software Matlab*, foi possível projetar ganhos do controlador e testar as respostas, onde inicialmente, tanto o projeto como os testes foram feitos a partir de um script em *Matlab*, e uma vez satisfeito com o resultado, o sistema foi testado no *Simulink*.

#### 3.3) Resultados

Antes de aplicar o controle, é necessário entender o diagrama de blocos do sistema e como ele é montado, tal diagrama foi exposto na figura abaixo:

**Figura 3: Diagrama de blocos do sistema**



Para o projeto do controlador, foi usado o lugar geométrico das raízes (LGR), para tanto, foi necessário primeiro calcular as funções transferências da planta (buck) e do sensor (realimentação) e do atraso, como é visto na seguinte sequência de figuras:

**Figura 4: Função transferência da planta no MATLAB**

$$G_p = \frac{50.91}{2.2e-08 s^2 + 4.545e-05 s + 1}$$

**Figura 5: Função transferência do atraso no MATLAB**

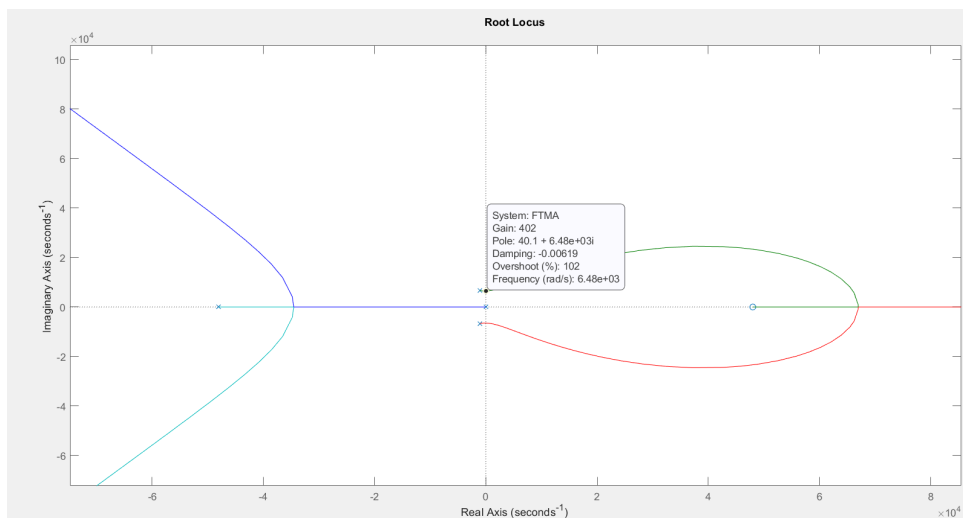
$$T_{ds} = \frac{-8.333e-05 s + 4}{8.333e-05 s + 4}$$

**Figura 6: Função transferência da sensor no MATLAB**

$$H_s = 0.1000$$

A priori o controlador usado integrador puro (dado que a planta é tipo zero, se faz necessário um controlador tipo 1), já que o mesmo obteve bons resultados, ele foi escolhido. O LGR segue na figura:

**Figura 7: LGR do sistema**



Por mais que pareça pequena, a faixa de estabilidade do sistema é extremamente alta, com o sistema precisando ter um ganho de acima de 402 para ter pólos complexos no semiplano direito.

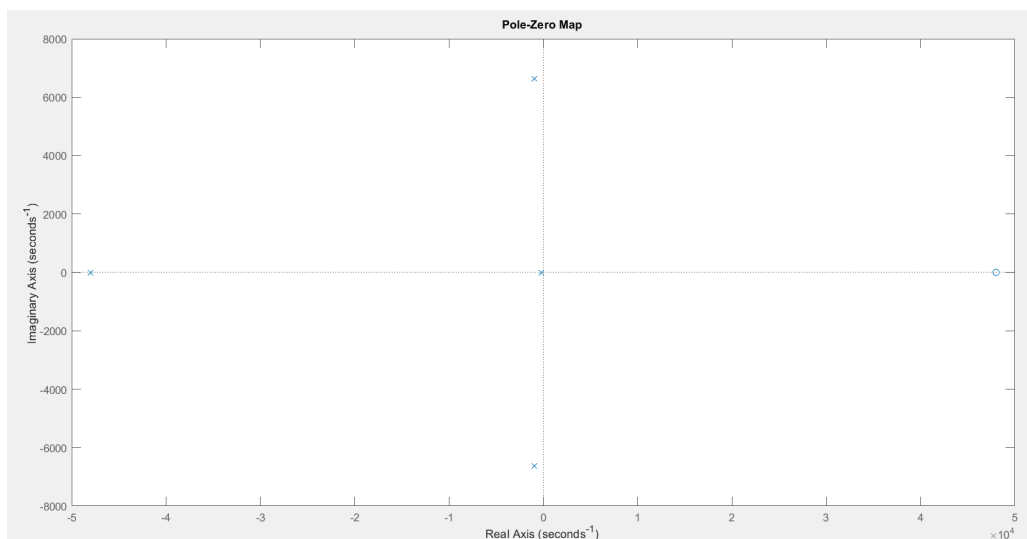
Com isso, foi escolhido um controlador integrador puro, com ganho 38, que gerou uma resposta válida, tal qual a tabela abaixo.

**Tabela 4: Dados do controlador**

Dado	Valor
Tipo	Integrador puro (I)
Ki	38
Tempo de assentamento (Ts)	20 ms
Máximo sobressinal (Mp%)	0%
Erro estacionário	0

No mais, o mapa de pólos e zeros do sistema ao fechar a malha também foram expostos, seguidos pela resposta do sistema ao degrau.

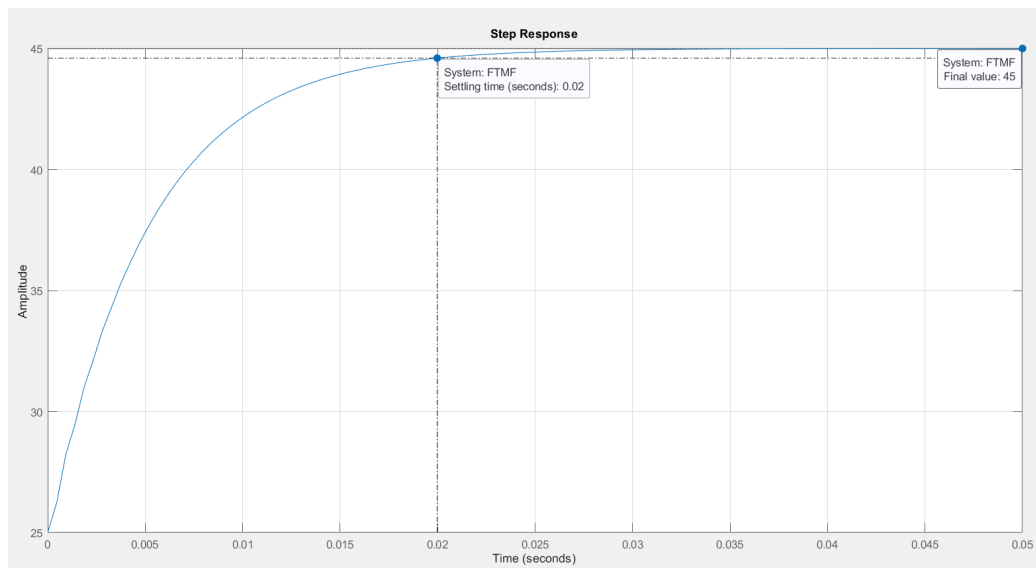
**Figura 8: Mapa e pólos e zeros em malha fechada do sistema**



Onde o zero de fase não mínima existe devido a aproximação de Padé.

Na figura abaixo, tem-se a resposta ao degrau do sistema, tal qual requisitada, variando de 25V a 45V

**Figura 9: Resposta do sistema ao Degrau (25V a 45V)**



### 3.4) Conclusões

Foi possível projetar e validar com êxito o funcionamento do controlador usando conhecimentos teóricos e práticos.

## 4) Parte 3: Simulação do sistema em malha fechada no MATLAB/Simulink

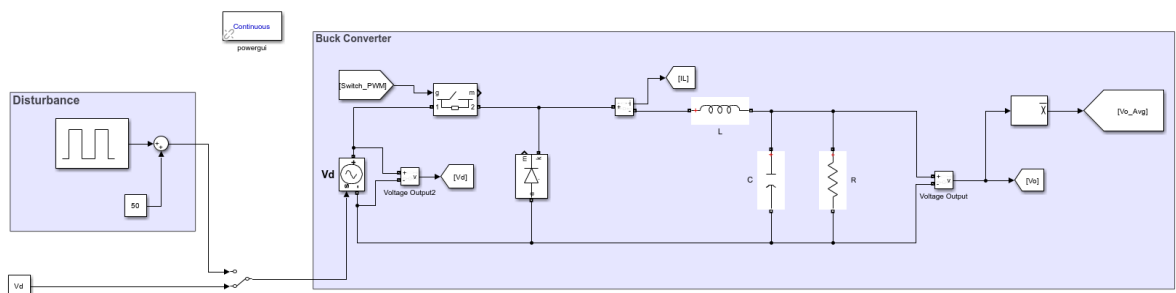
### 4.1) Objetivos

Validar o controle anteriormente projeto no *software Matlab*.

### 4.2) Metodologia

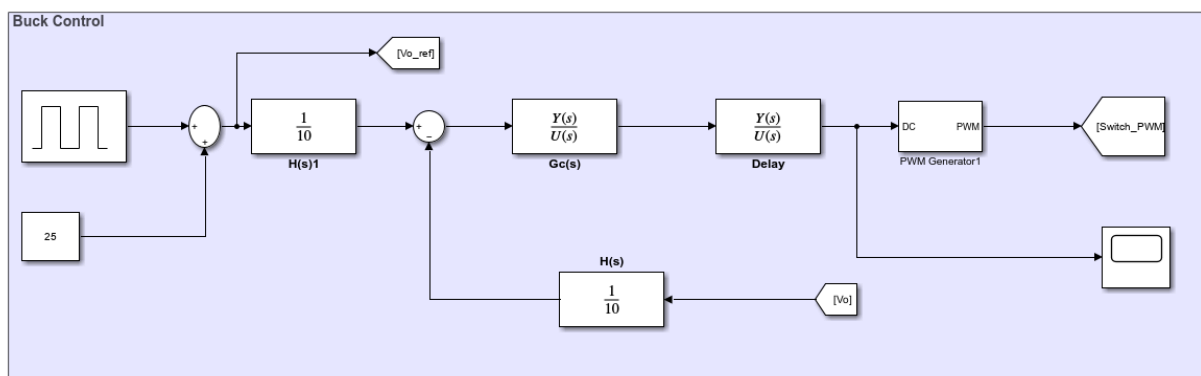
Para testar o controle, foi simulado um circuito buck, usando os valores da tabela 1. a montagem é exposta na figura abaixo:

**Figura 10: Simulação do circuito Buck**



No mais, a realimentação o atraso e o controlador foram implementados como blocos de função transferência, tal qual a figura xn:

**Figura 11: Simulação do circuito de controle**

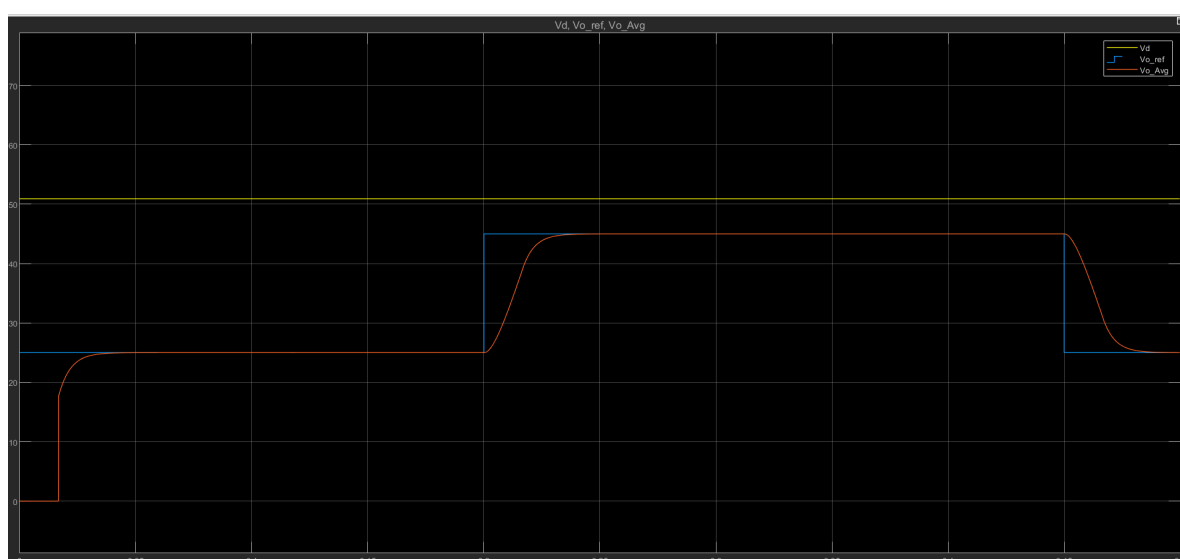


### 4.3) Resultados

Para a primeira parte, o foco foi testar o sistema para mudanças descendentes e ascendentes de referência, para tanto foram usados pulsos que variam o valor entre 25V e 45V, tal qual especificado no projeto.

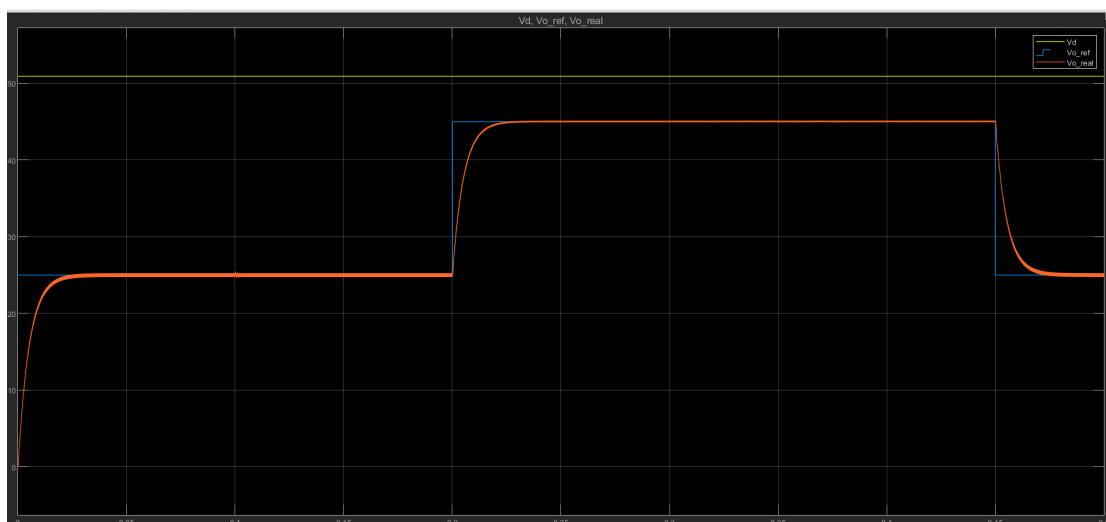
Primeiro usando plotando o valor médio, e em seguida a figura do valor simulado direto da tensão  $V_o$

**Figura 12: Simulação da resposta ao degrau ( $V_o$  Médio)**





**Figura 13: Simulação da resposta ao degrau ( $V_o$ )**



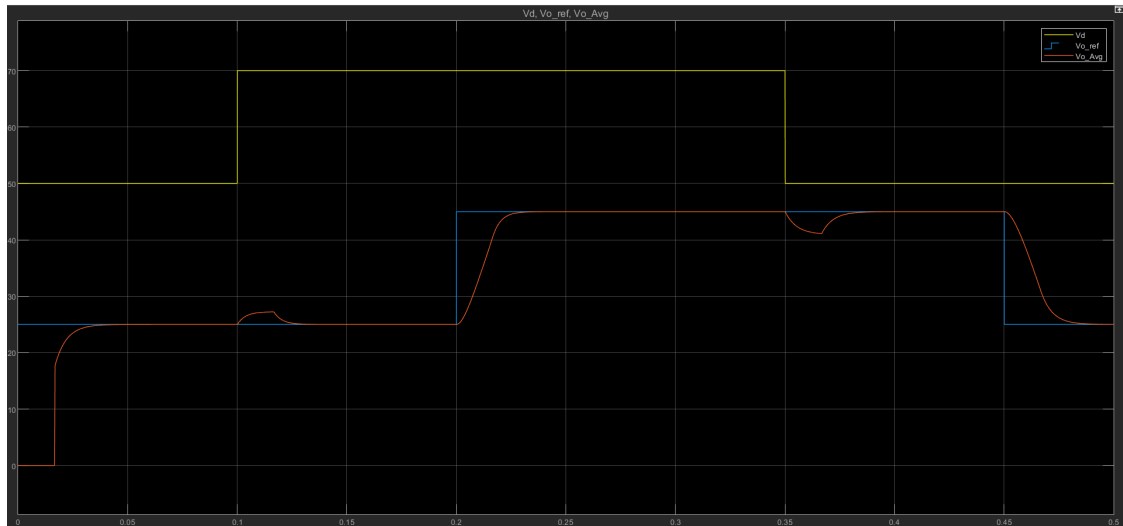
Os valores adquiridos de Tempo de assentamento, máximo sobressalto e erro estacionário estão expostos na tabela 5.

**Tabela 5: Tempos no Simulink**

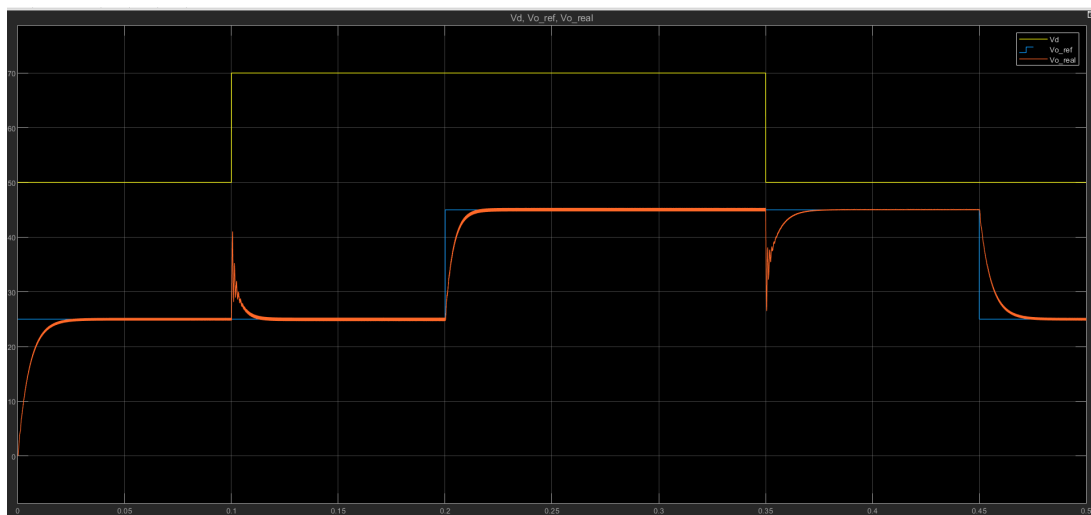
Dado	Valor
Tempo de assentamento ( $T_s$ )	20.28 ms
Máximo sobressinal ( $M_p\%$ )	0%
Erro estacionário	0

Por fim, também foi testada a resposta a distúrbios, para tanto, houve uma mudança no barramento cc de 50V para 70V além do degrau. as figuras abaixo ilustram a resposta do sistema ao distúrbio:

**Figura 14: Simulação da Resposta ao Distúrbio ( $V_o$  Médio)**



**Figura 15: Simulação da Resposta ao Distúrbio ( $V_o$ )**



#### **4.4) Conclusões**

Foi possível simular com êxito o sistema projetado anteriormente, o mesmo agiu dentro dos parâmetros esperados.

### **5) Parte 4: Realização experimental do controle em malha fechada**

#### **5.1) Objetivos**

Realizar experimentalmente o controle em malha fechada do conversor buck, utilizando os materiais em laboratório para validar as simulações anteriormente feitas.

## 5.2) Metodologia

Para melhorar a organização, tanto o projeto como a montagem foi dividida em quatro partes:

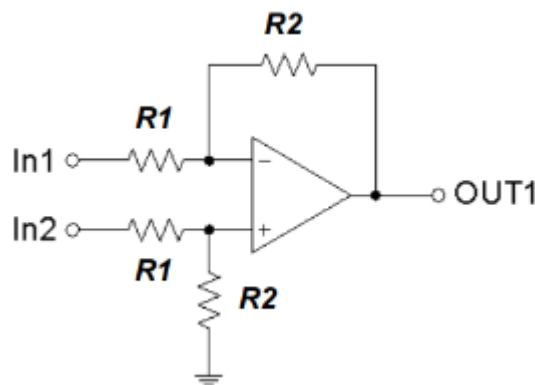
1. Realimentação
2. Controle
3. Condicionamento de Sinais
4. Geração de PWM

Cada qual será devidamente explicada abaixo:

### Realimentação e comparador

Na parte relativa a realimentação, está a leitura do sinal de tensão  $V_o$  foi feita com o circuito comparador visto anteriormente (com ganho 0.1), similarmente, a comparação entre o sinal de  $V_o$  e a referência  $V_o^*$  é feita.

**Figura 16: circuito analogico do comparador**



**Figura 17: Lógica do comparador**

$$H(s) = \frac{R2}{R1} (In2 - In1)$$

$$R1 = R2 = 2 \text{ k}\Omega$$

Obs:

$$R1 = R_{ref1} = R_{fd1}, \quad R2 = R_{ref2} = R_{fd2}$$

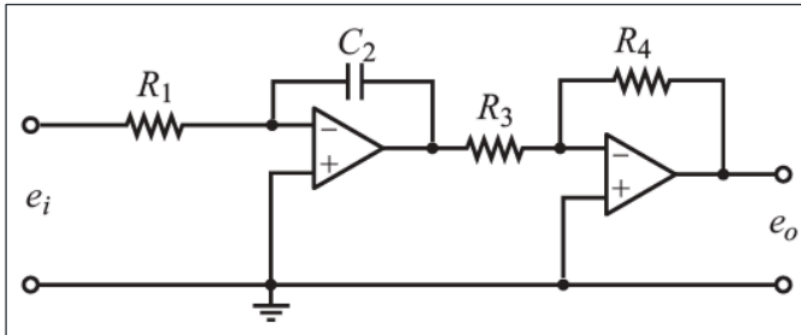
Logo:

$$H(s) = (Degrau - Saída)$$

## Controle

Controle é o circuito analógico do Integrador é mostrado abaixo.

**Figura 18: circuito analogico do Integrador**



$$TF = \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{R_1 C_2 s}$$

**Tabela 6: Valores do controlador**

Parâmetro	Valor
C2	1µF
R1	10 kΩ
R3	10 kΩ
R4	3.8 kΩ

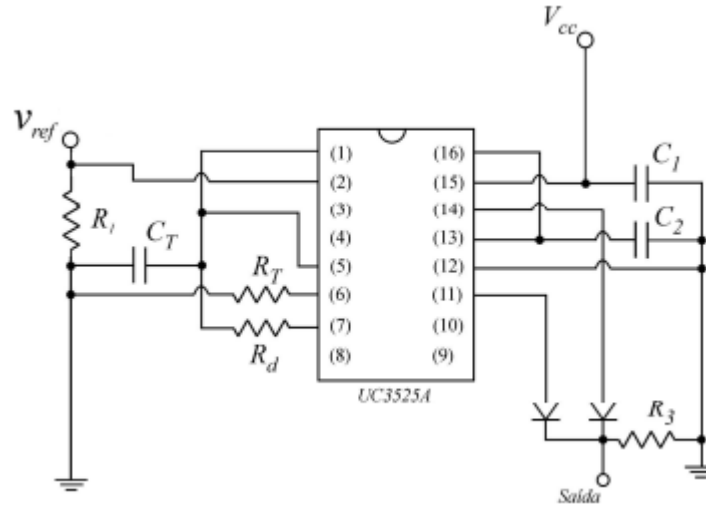
## Condicionamento de Sinais

Condicionamento de sinais é o processo de pegar a saída do controlador (de 0 a 1V) e a coloca na escala aceita pelo CI que gera o PWM (de 1.22V a 3.4V), que foi feito com um somador inversor conectado a um amplificador inversor.

## Geração de PWM

A geração de PWM foi feita com o CI UC3225A, tal qual a imagem abaixo, onde Vref é o valor que vem do circuito de condicionamento do sistema

### Figura 19: Gerador de PWM



Para a frequência desejada, os seguintes valores foram usados:

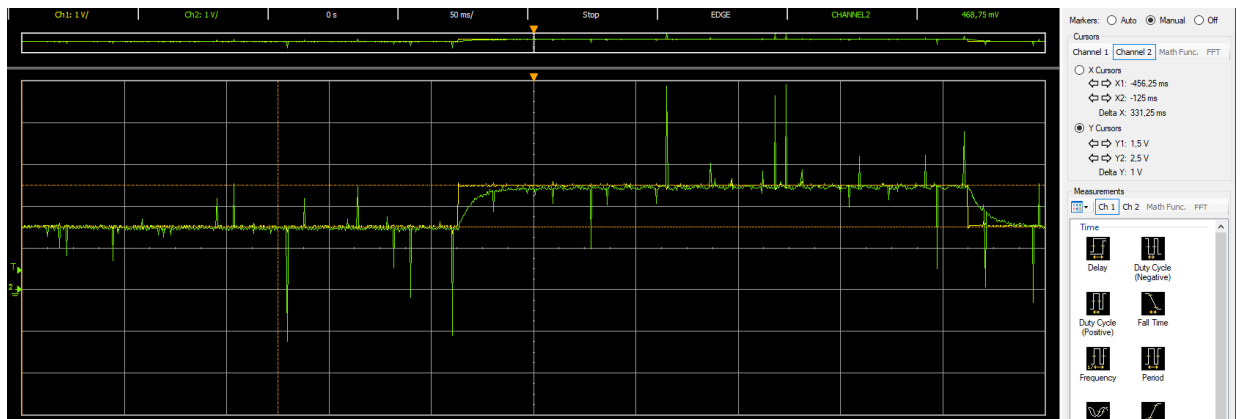
**Tabela 7: Valores do circuito gerador de PWM**

$R_I$	1k $\Omega$
$R_T$	10k $\Omega$
$R_D$	10 $\Omega \sim 100\Omega$
$R_3$	1k $\Omega$
$C_T$	15nF
$C_1, C_2$	1uF
<i>Diodos</i>	UF4004

### 5.3) Resultados

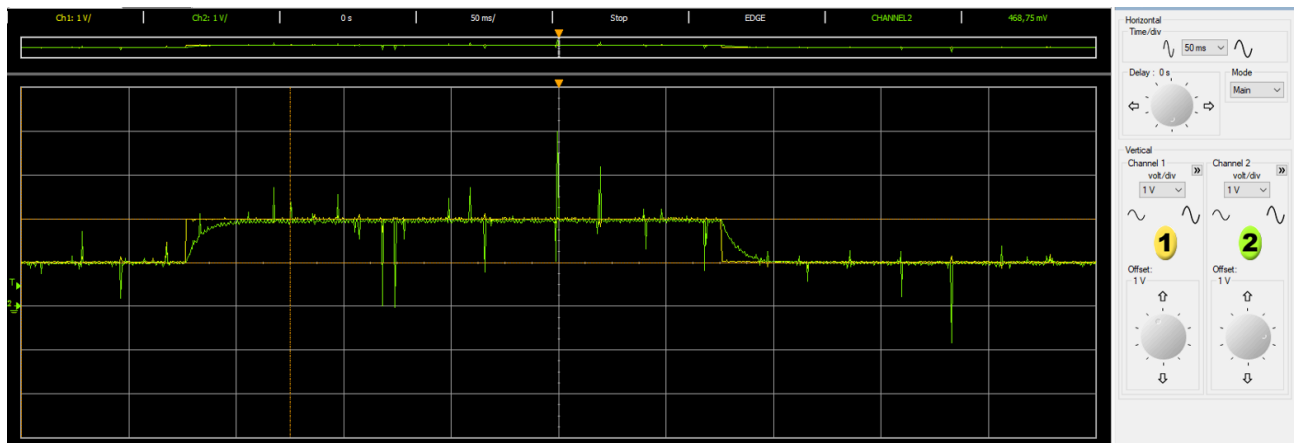
Para os resultados, têm-se as resposta do circuito ao degrau, onde os valores reais de tensão são 10x maiores (dado que a realimentação tem ganho 0.1)

**Figura 20: Resposta ao Degrau (15V para 25V)**



É válido salientar que ruídos de medição fizeram o sinal se deslocar levemente para baixo, mas foi testado que a referência e a entrada batem e o erro estacionário é nulo como esperado

**Figura 21: Resposta ao Degrau (10V para 20V)**



**Tabela 7: Comparação entre valores experimentais e simulados**

Requisito	Valor Experimental	Valor Simulado	Erro (%)
Tempo de acomodação ( $T_s$ )	21.87 ms	20.28 ms	7.8%
Máximo Sobressinal ( $M_p\%$ )	0%	0%	0%
Erro Estacionário ( $E_{ss}$ )	0	0	0

## 5.4) Conclusões

Foi possível validar com êxito o funcionamento do controle do conversor. Com os baixos valores de erro é visível que o circuito foi montado e testado devidamente.

