



**UNICAMP**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

---

## **ES563 - Laboratório de Máquinas Elétricas**

### **Relatório Prova 1**

---

*Nome*

Matheus G. A. Sasso

Iuri Mandello

*RA*

158257

170214

4 de agosto de 2019

# Sumário

<b>1</b>	<b>Questão1</b>	<b>2</b>
1.1	a . . . . .	2
1.2	b . . . . .	4
1.3	c . . . . .	4
1.4	d . . . . .	4
1.5	e . . . . .	5
1.6	f . . . . .	7
1.7	g . . . . .	7
1.8	h . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Questão2</b>	<b>10</b>
2.1	a . . . . .	10
2.2	b . . . . .	10
2.3	c . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Questão3</b>	<b>11</b>
3.1	Modelo do circuito . . . . .	11
3.2	Cálculo do fator de potência . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Questão 4</b>	<b>12</b>
4.1	Formas de onda . . . . .	12
4.2	Tensão média no indutor . . . . .	14
4.3	Cálculo do fator de potência . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Questão5</b>	<b>17</b>
5.1	Item a . . . . .	17
5.2	Item b . . . . .	18
5.3	Item c . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Questão6</b>	<b>21</b>
6.1	a . . . . .	21
6.2	b . . . . .	21
6.3	c . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>25</b>

## 1 Questão1

Para todos os circuitos teremos os seguintes dados:

- $R = 100\Omega$
- $f = 60\text{Hz}$
- $V_s = 380\text{V}$

### 1.1 a

A seguir temos o circuito retificador de onda completa carga R:

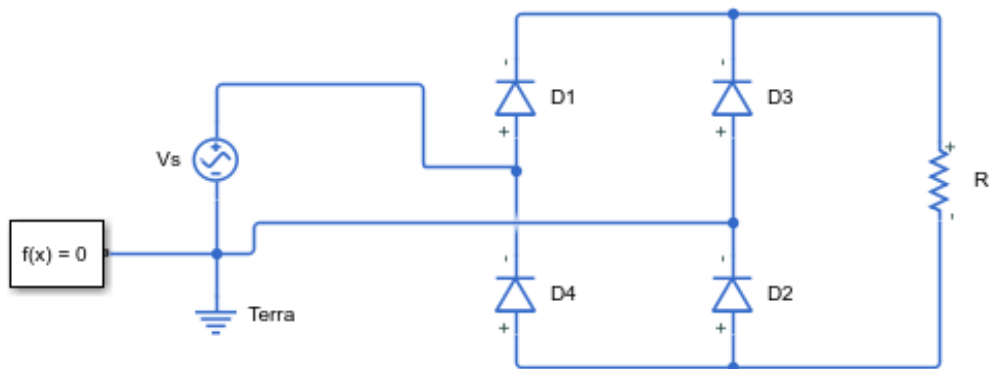


Figura 1: Circuito Retificador de Onda Completa Carga R.

A tensão nos diodos é dada por:

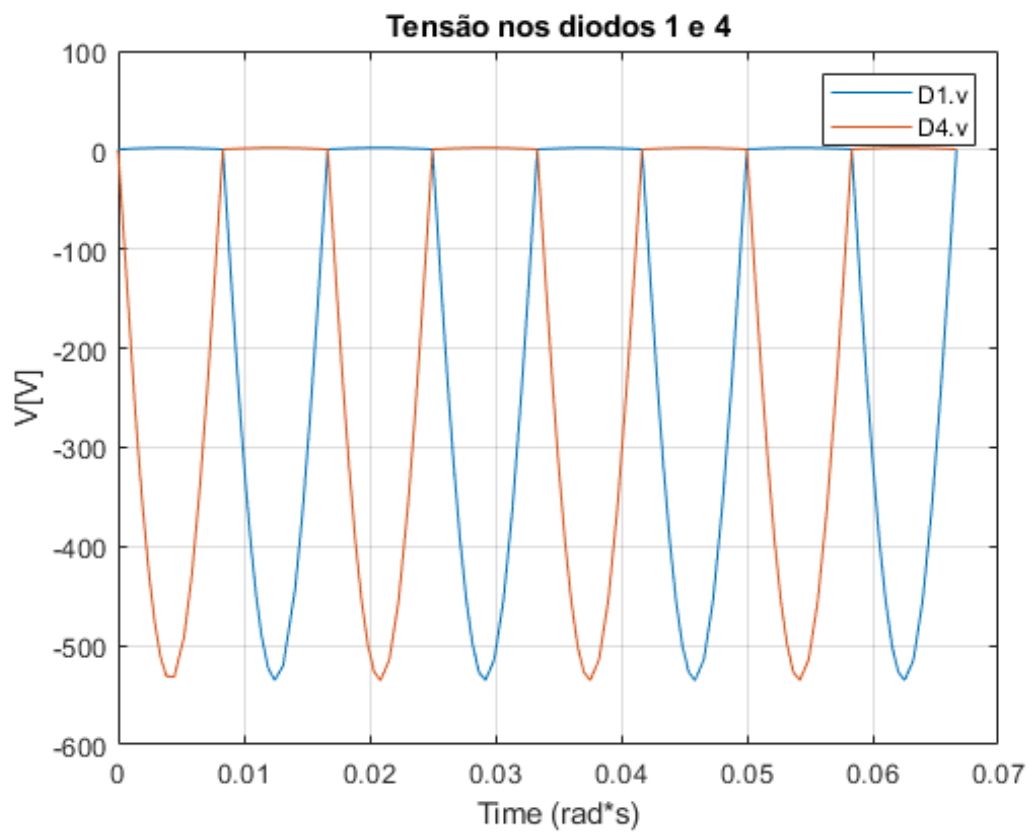


Figura 2: Tensão nos diodos 1 e 4 para carga R

A corrente nos diodos é dada por:

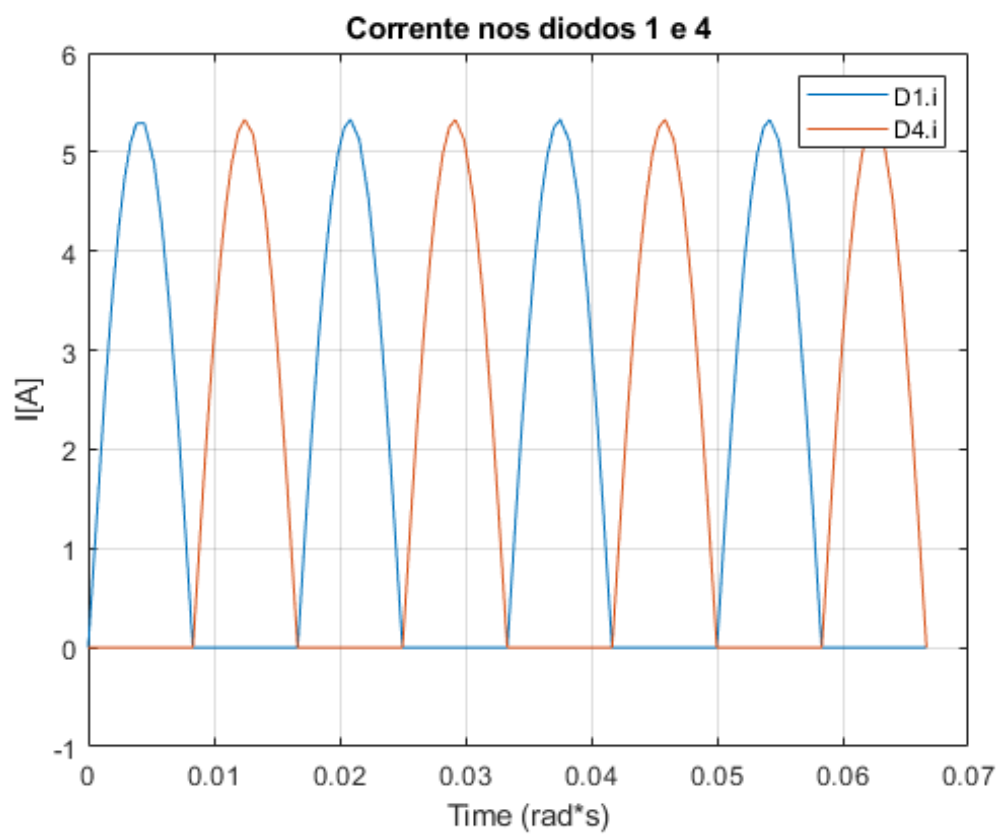


Figura 3: Corrente nos diodos 1 e 4 para carga R

## 1.2 b

O fator de potência é dado por

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \quad (1)$$

Para analisar S utilizaremos  $V_{ef}$  e  $I_{ef}$  Para calcular P utilizaremos a tensão na saída, para o retificador de onda completa temos que:

$$V_o = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot V_{ef}}{\pi} \quad (2)$$

$$FP = \frac{V_o^2 / R}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot V_{ef}}{R \cdot I_{ef} \cdot \pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2}{\pi} \quad (3)$$

## 1.3 c

Como temos dois diodos em série para cada ciclo, a tensão de ruptura mínima que cada diodo deve suportar é:

$$V_{rup} = \frac{V_p}{2} = \frac{380 \cdot \sqrt{2}}{2} = 268,701V \quad (4)$$

## 1.4 d

Incluindo um capacitor em paralelo à carga de 100uF no circuito temos:

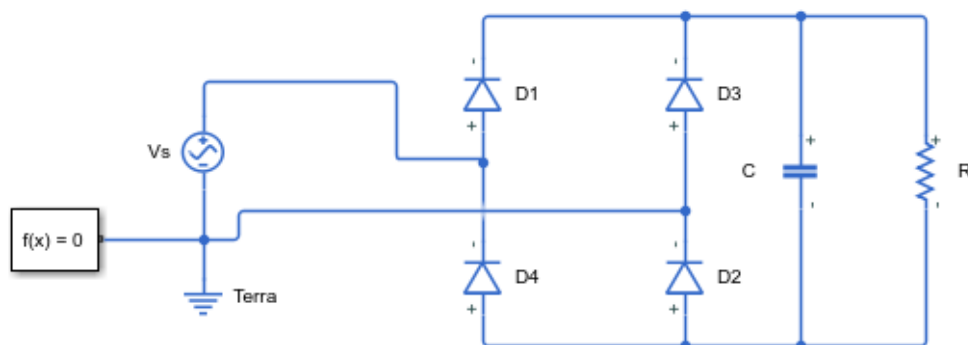


Figura 4: Circuito Retificador de Onda Completa Carga R com filtro C.

A tensão de saída no resistor é dada por:

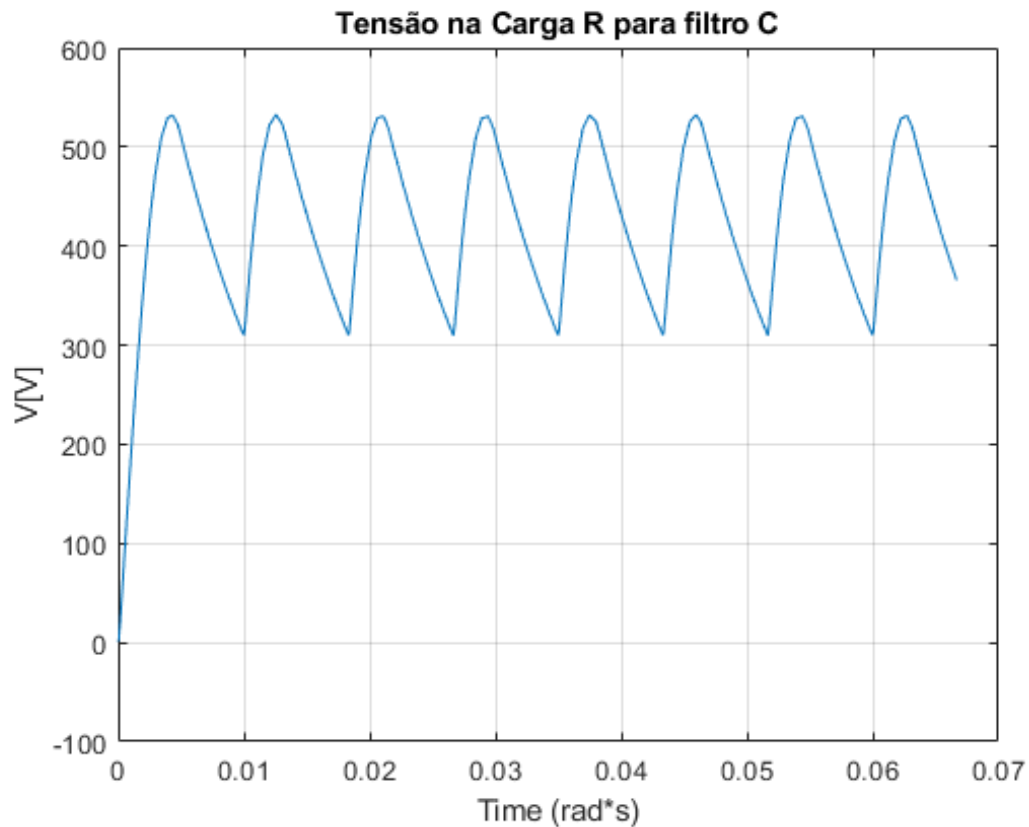


Figura 5: Circuito Retificador de Onda Completa Carga R com filtro C.

Visto que há duas recuperações de tensão no resistor durante um ciclo, que correm quando  $V_r > V_c$ . Isso ocorre porque o resistor está sendo carregado durante o ciclo positivo e o negativo. Entretanto quando  $V_c > V_r$  a tensão do capacitor é consumida.

Logo, a tensão média no resistor aumenta.

## 1.5 e

O circuito ao introduzir um filtro indutivo temos o seguinte circuito:

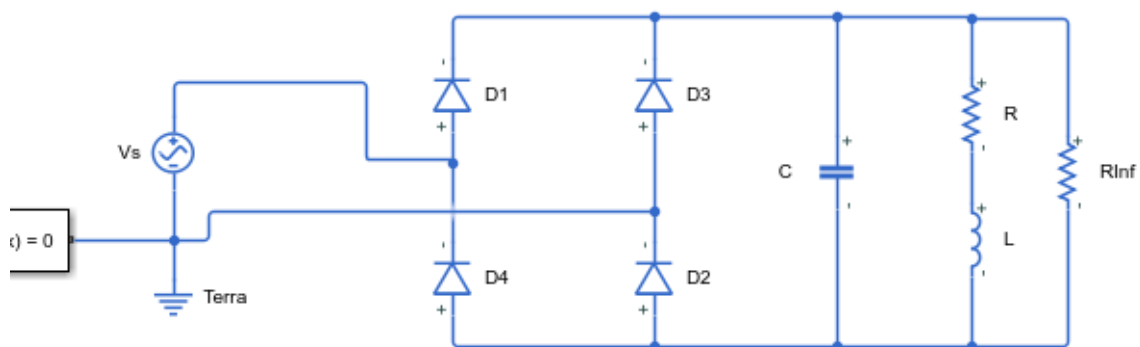


Figura 6: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R com filtro LC e  $H=1H$ .

Incluindo um indutor em série à carga de  $1H$  no circuito temos:

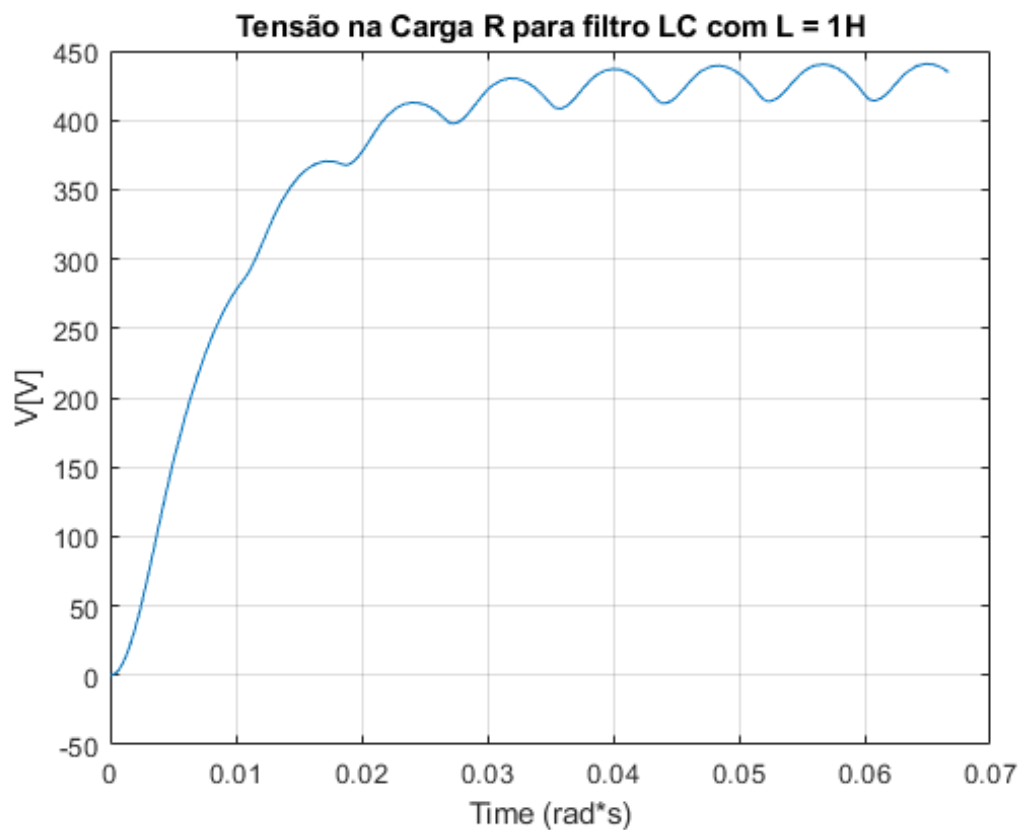


Figura 7: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R com filtro LC e  $H=1H$ .

Incluindo um indutor em série à carga de  $0.1H$  no circuito temos:

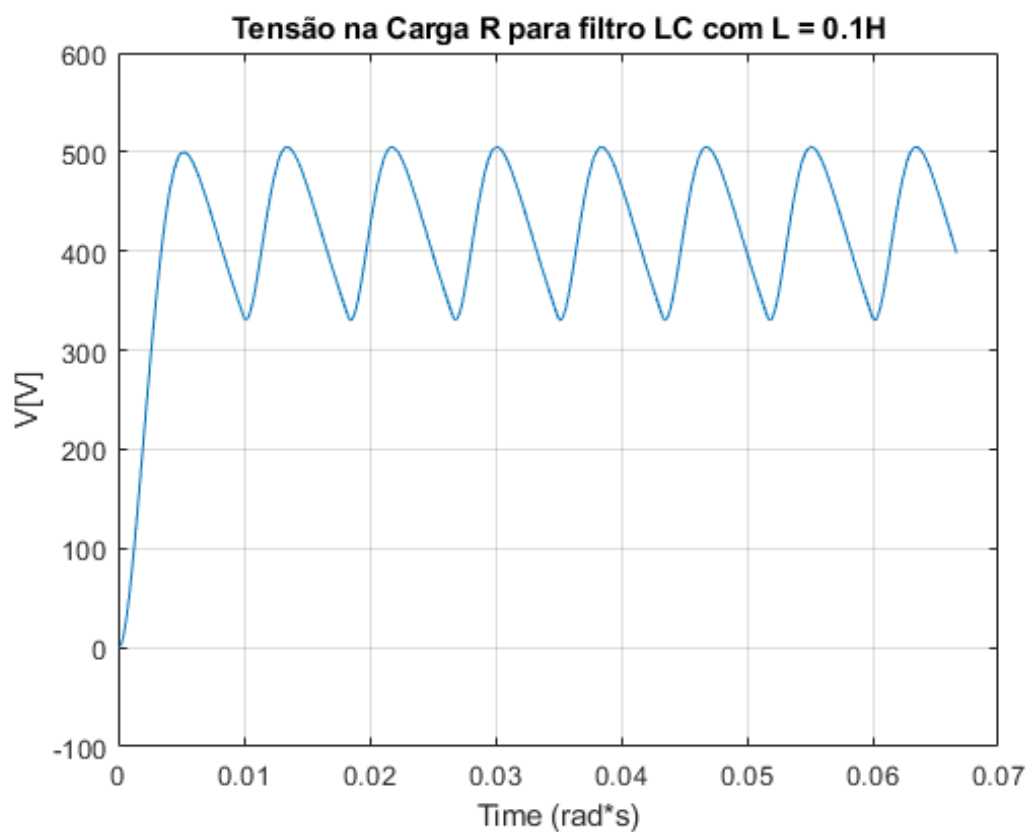


Figura 8: Circuito Retificador de Onda Completa Carga R com filtro LC e  $H=0.1H$ .

Como podemos observar, o indutor controla a amplitude do Ripple, mas a tensão média continua a mesma do que para o filtro apenas Capacitivo, apesar da retificação ser mais eficiente para valores maiores de indutância.

## 1.6 f

Não, pois a presença da indutância melhora a retificação, mas o valor médio da tensão na carga continua a mesma. Como mostrado no item anterior.

## 1.7 g

Colocando um indutor poderíamos filtrar a corrente, o que faria que houvésssemos uma corrente média maior, logo uma potência ativa  $P$  maior, e por conseguinte um fator de potência  $FP$  maior.

## 1.8 h

Curto circuito Para o caso de curto circuito temos o circuito:

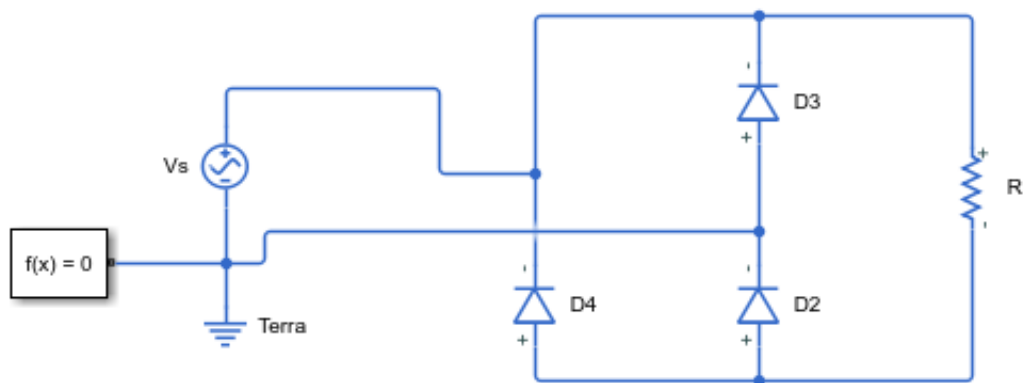


Figura 9: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R e Diodo como curto circuito

O comportamento da tensão no resistor é dado por:



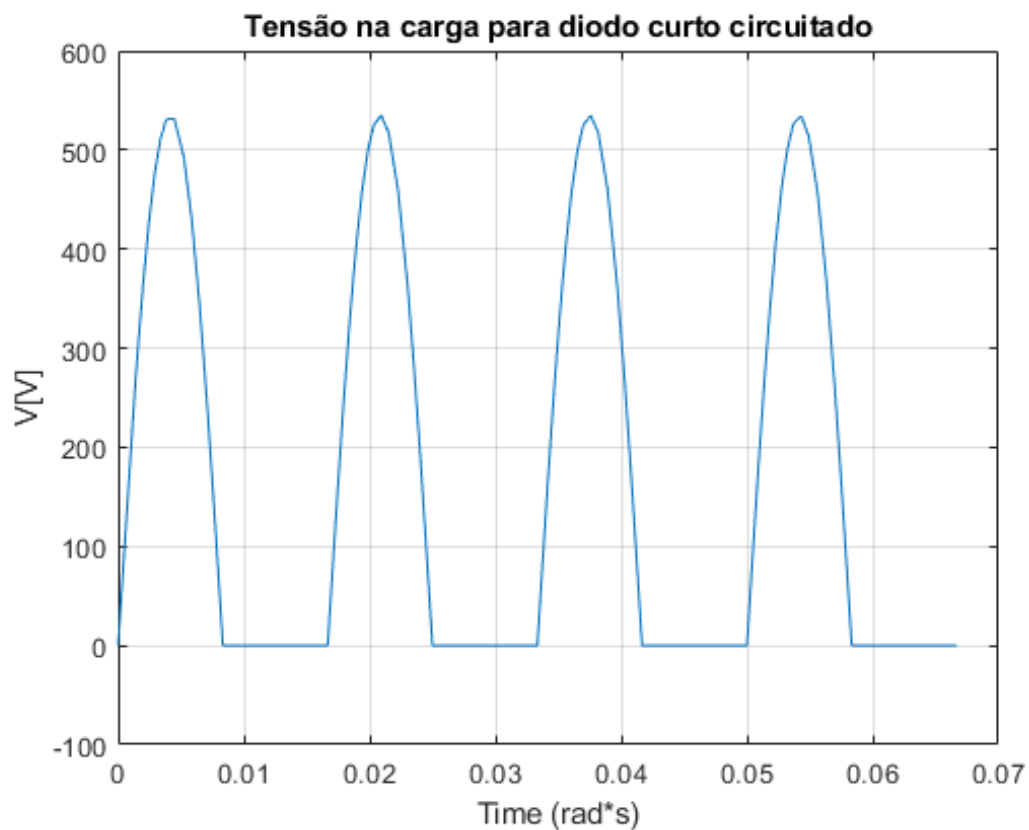


Figura 10: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R com filtro LC e  $H=1H$ .

Como conclusão, se colocarmos em curto circuito, durante o **ciclo positivo da fonte** ocorre retificação no resistor, sendo um circuito retificador de meia onda.

Circuito aberto

Para o caso de curto circuito temos o circuito:

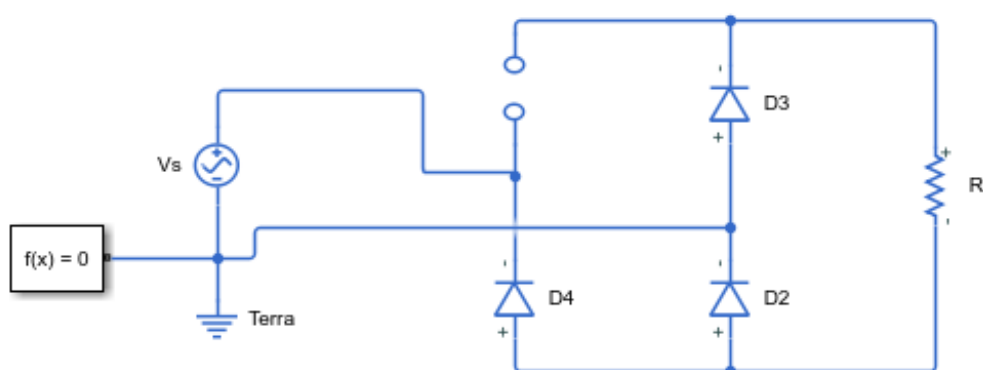


Figura 11: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R e Diodo como circuito aberto.

O comportamento da tensão no resistor é dado por:

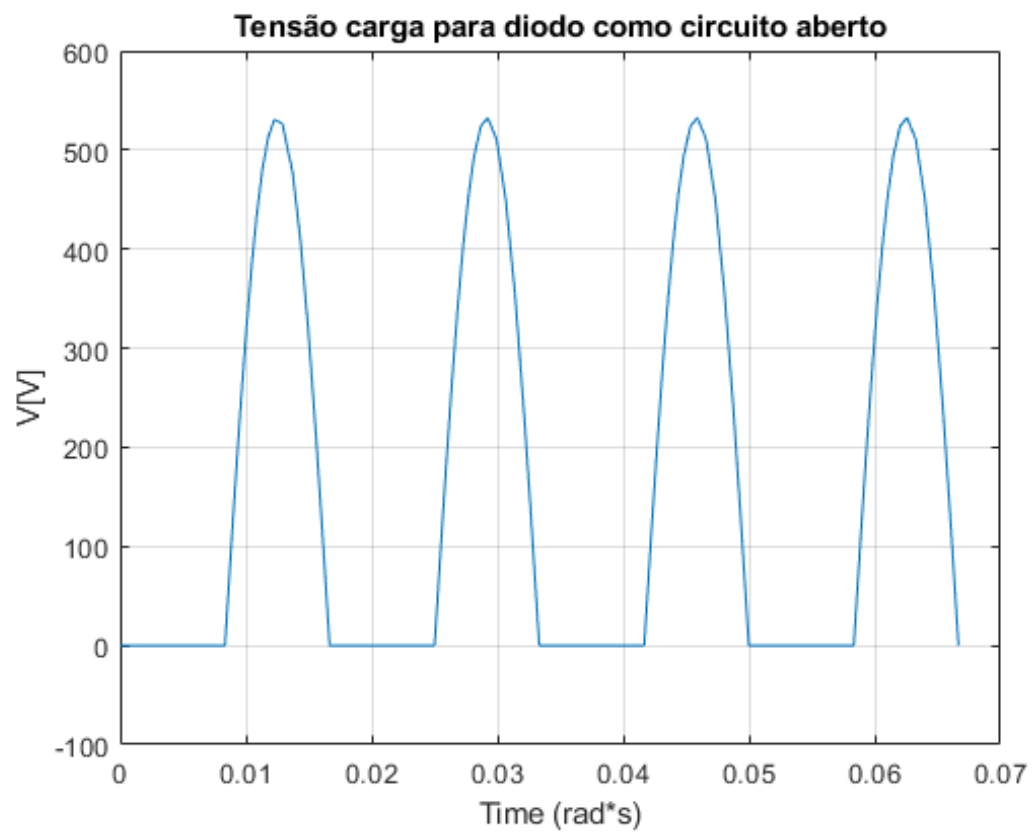


Figura 12: Circuito Retificador de Onda Completa a Carga R com filtro LC e  $H=1H$ .

Como conclusão, se colocarmos em curto circuito, durante o **ciclo negativo da fonte** ocorre retificação no resistor, sendo um circuito retificador de meia onda.

## 2 Questão2

### 2.1 a

Temos que as seguintes formulas para representar a corrente RMS:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_n^2} \quad (5)$$

$$I_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (6)$$

E para TDH temos:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (7)$$

Combinando as temos que:

$$I = I_1 \cdot \sqrt{1 + TDH^2} = 10.96 \cdot \sqrt{1 + 0.2815^2} = 11,386A \quad (8)$$

- Fator de Forma (FF):

$$FF = \frac{I_1}{I} = \frac{10.960}{11,386} = 0.9625 \quad (9)$$

- Fator de Deslocamento (FD):

$$FD = \cos(\phi_1) = \cos(-12.01) = 0.9781 \quad (10)$$

### 2.2 b

Para a entrada:

Potência aparente na entrada(S): A corrente eficaz na entrada é mesma que na saída do retificador logo:

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} = \frac{150}{\sqrt{2}} \cdot 11,386 = 1.207kVA \quad (11)$$

Fator de Potência (FP):

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + TDH^2}} = \frac{0.9781}{\sqrt{1 + 0.2815^2}} = 0.9415 \quad (12)$$

### 2.3 c

De maneira aproximada, pela análise da tensão de saída temos que:

$$V_o(t) = 90 + 40 \cdot \sin(\omega t) \quad (13)$$

Sabendo que 90V é a componente DC e  $40 \cdot \sin(\omega t)$  a componente AC

Para calcular a tensão RMS temos que:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(\omega t)^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 1600 \cdot \sin^2(\omega t) + 7200 \cdot \sin(\omega t) + 8100 dx} = \quad (14)$$

Como a corrente na entrada é a mesma da saída temos que:

- Fator de Ondulação (FO):  $FO = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}} = \frac{135 - 50}{135} = 0.629$  Fator de Forma (FF) :  $FF =$

### 3 Questão3

#### 3.1 Modelo do circuito

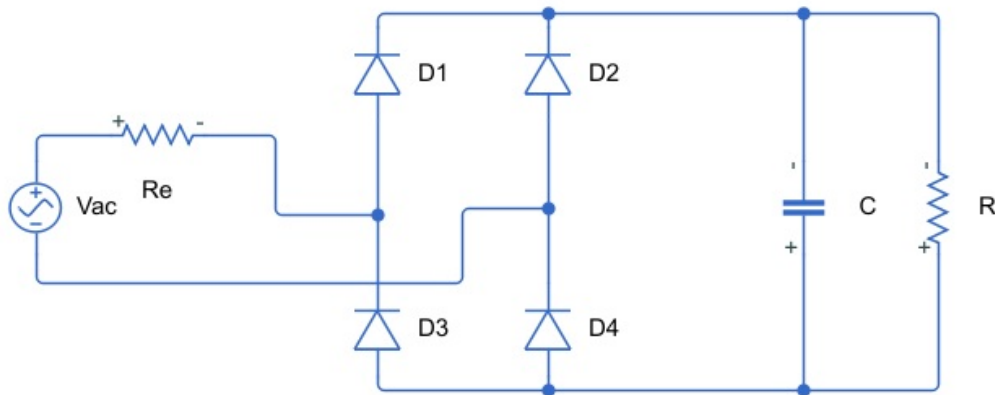


Figura 13: Circuito retificador monofásico de onda completa - RC.

#### 3.2 Cálculo do fator de potência

Podemos notar que o resistor na entrada pode ser utilizado como um método de aferir a corrente através da medição de sua tensão. Assim, temos que o sinal 2 representa a corrente na entrada do retificador, enquanto a média do produto dos sinais 1 e 2 é sua Potência Ativa(P). Sendo assim:

$$P = 74.22W \quad (15)$$

Podemos obter a Potência Aparente(S) através da multiplicação dos valores RMS do sinal 1(Tensão) e do sinal 2(Corrente), assim:

$$S = V_{rms} * I_{rms} = 218 * 0.599 = 130.582VA \quad (16)$$

Portanto, para o cálculo do fator de potência:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{74.22}{130.582} = 0.568 \quad (17)$$

## 4 Questão 4

Foi construído o seguinte modelo de retificador trifásico de onda completa no Simulink. O valor escolhido para a indutância foi de 250mH.

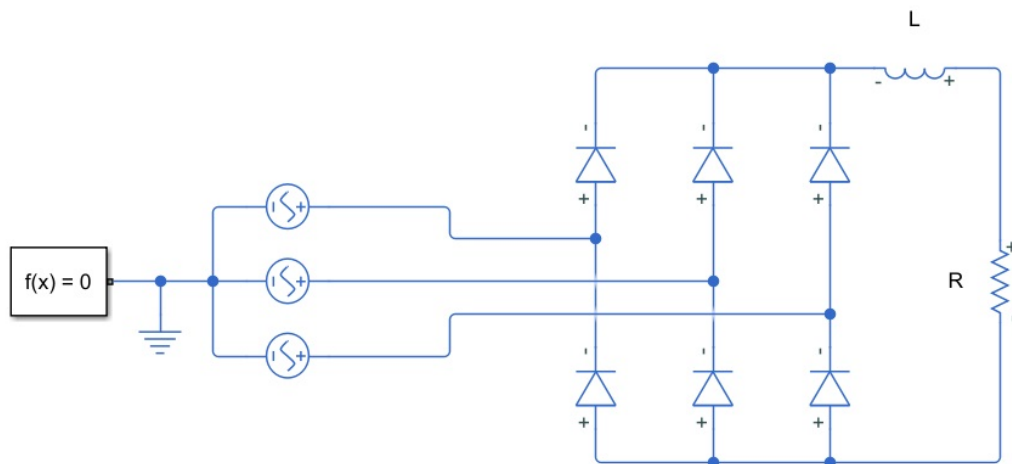


Figura 14: Modelo do circuito construído no Simulink.

### 4.1 Formas de onda

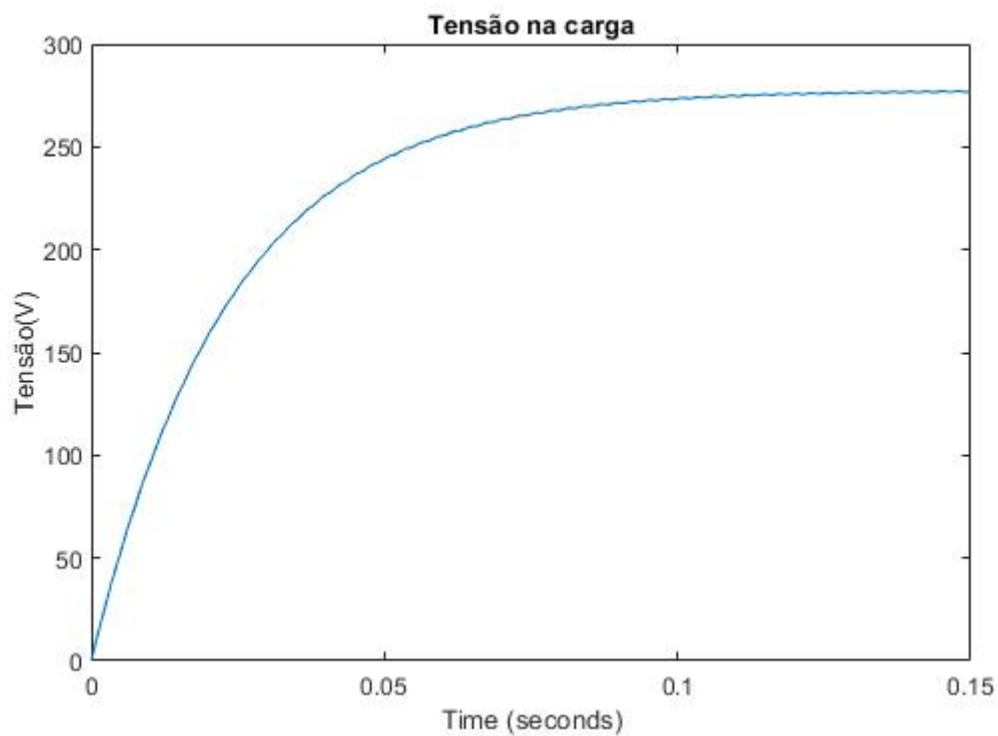


Figura 15: Tensão na carga.

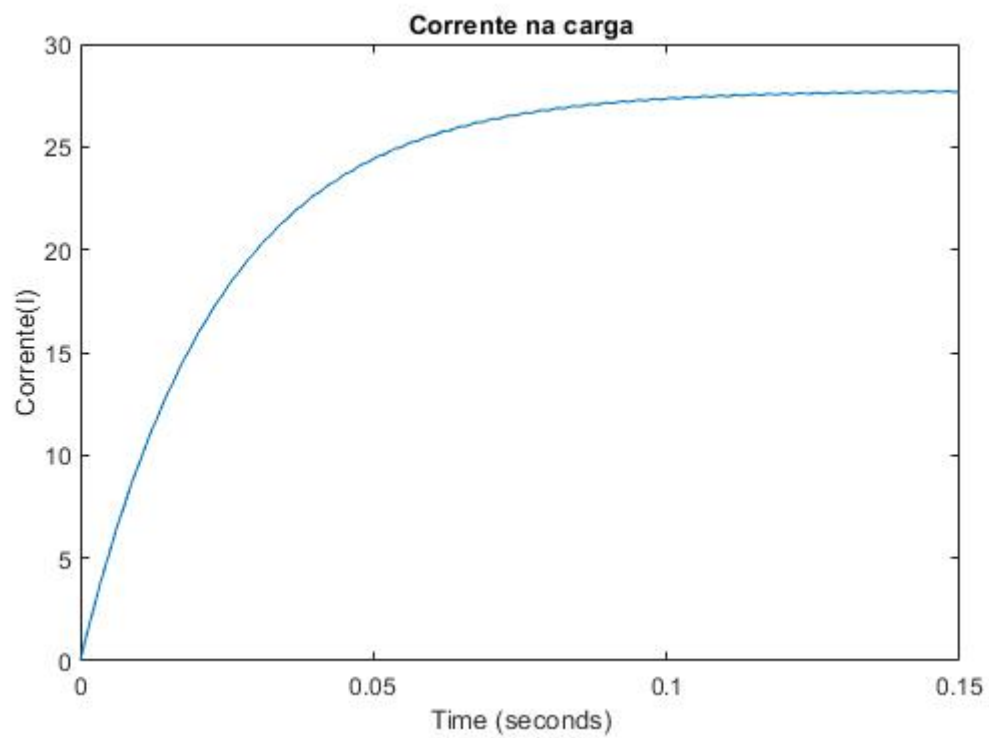


Figura 16: Corrente na carga.

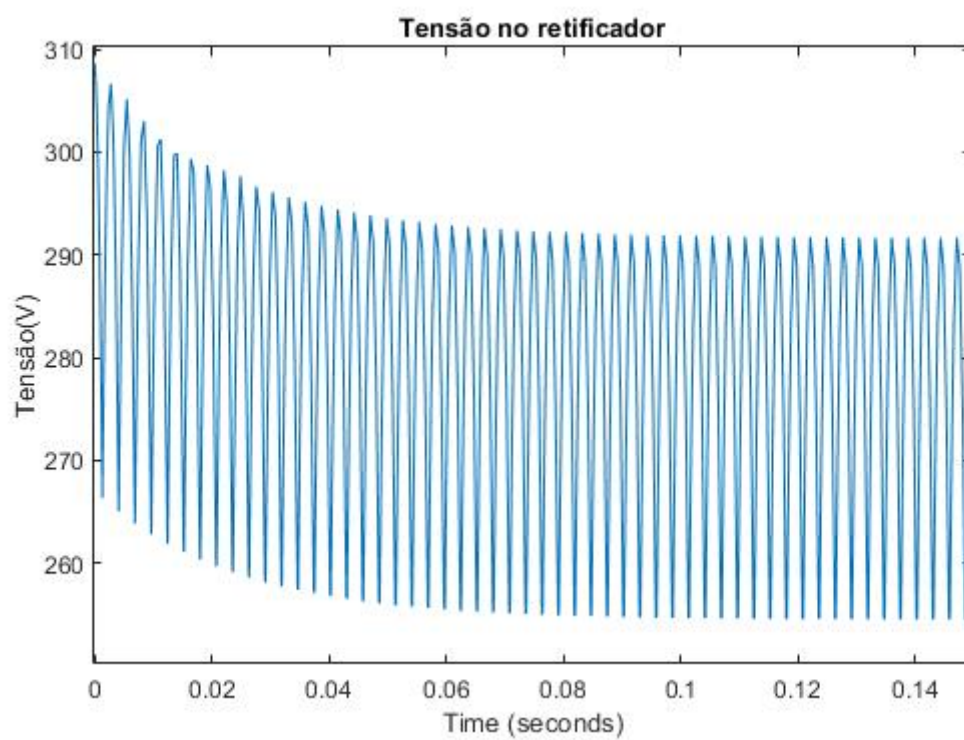


Figura 17: Tensão na saída do retificador.

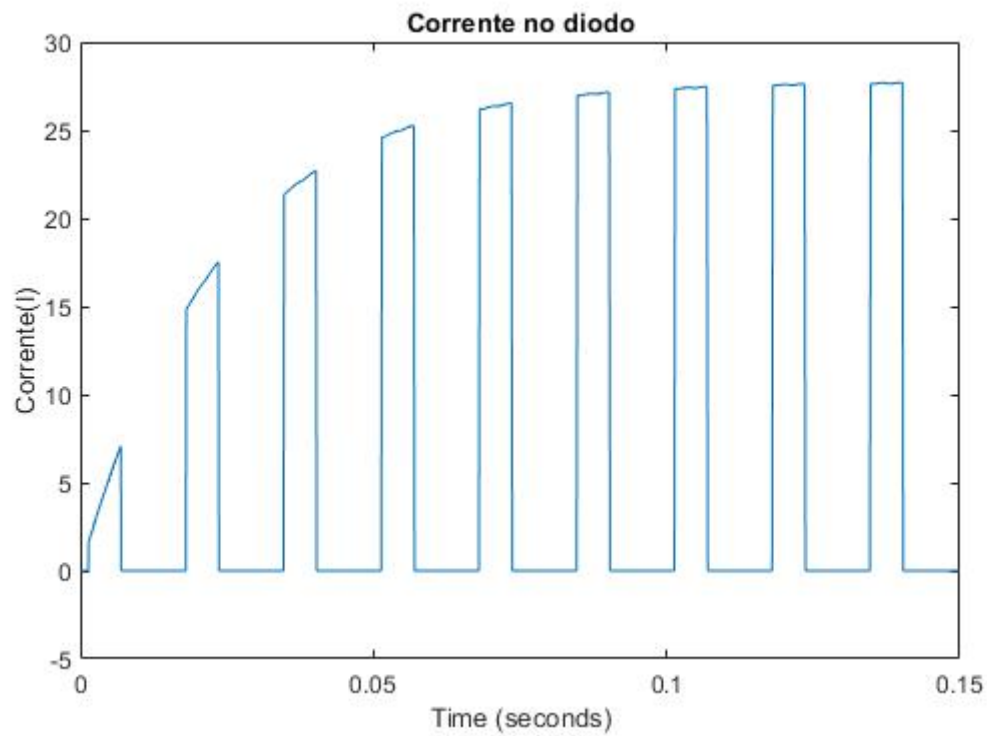


Figura 18: Corrente no diodo.

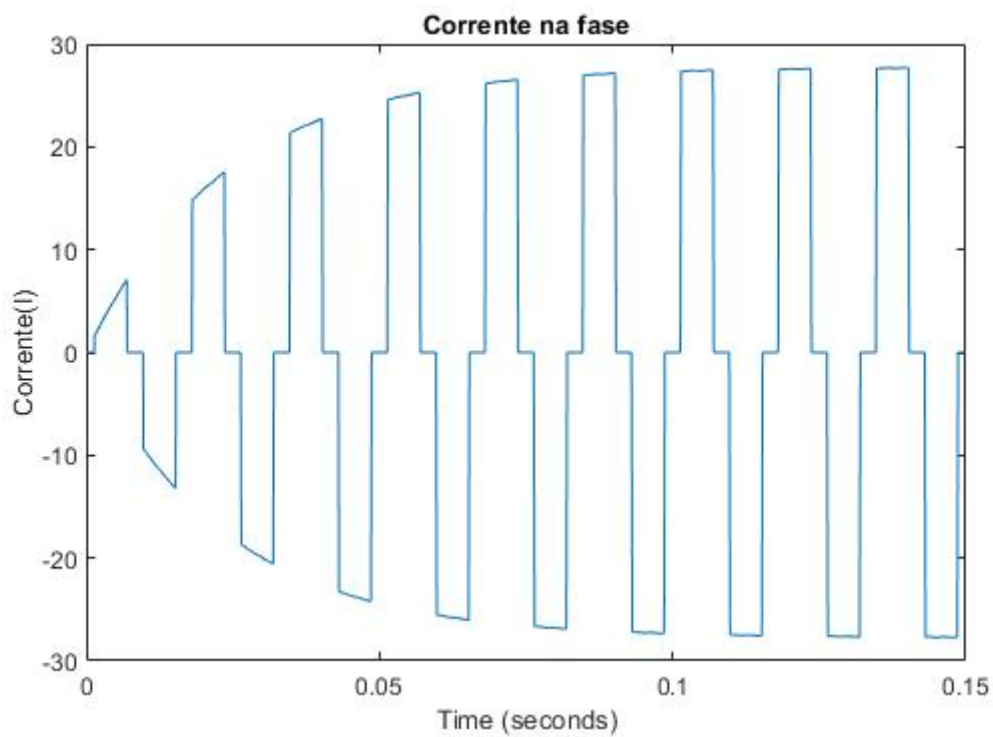


Figura 19: Corrente na fase.

## 4.2 Tensão média no indutor

Realizando o cálculo da tensão média no indutor, temos que após seu carregamento inicial a tensão tende 0. Logo, em regime permanente,  $V_{lmed} = 0$ .

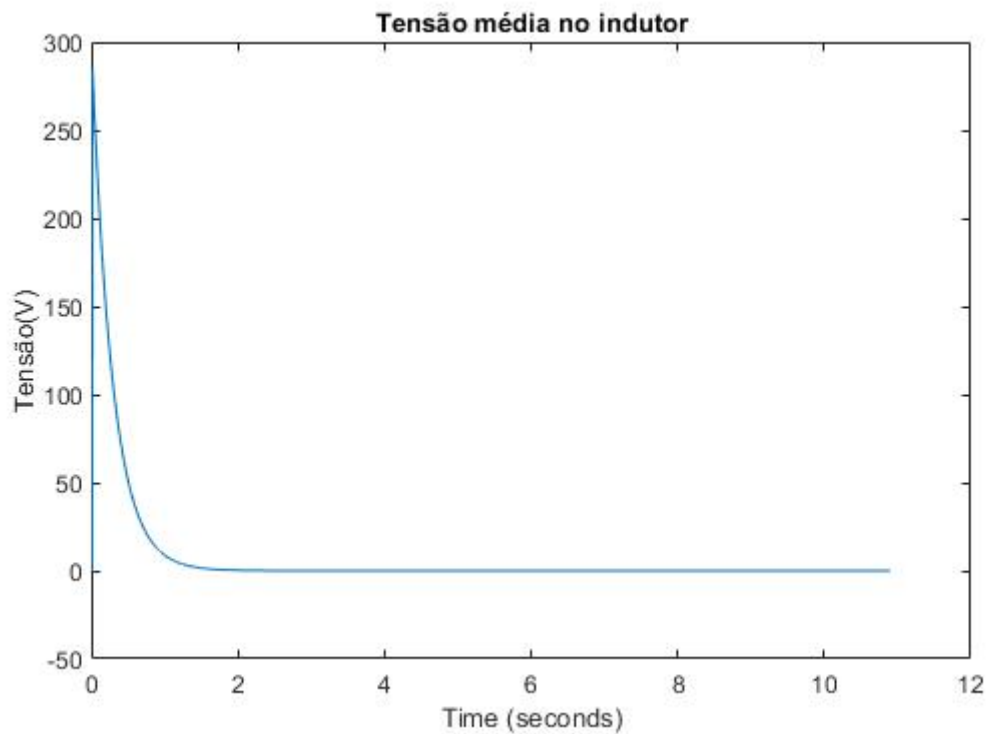


Figura 20: Tensão média no indutor.

### 4.3 Cálculo do fator de potência

Para realizar o cálculo do fator de potência no MATLAB, foi utilizado o bloco de multiplicação para obter o valor do produto dos sinais de tensão e corrente de entrada em uma fase:

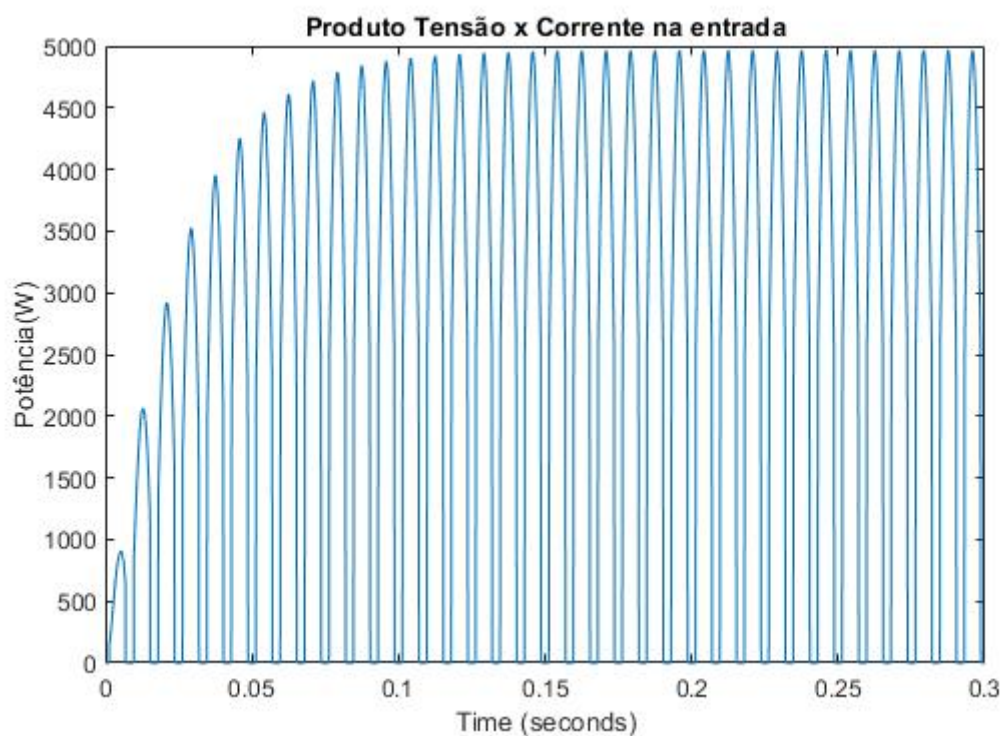


Figura 21: Produto de tensão e corrente na entrada.

Como sabemos, o valor médio desse produto é a Potência Ativa. Realizando esse cálculo através do bloco Mean do Simulink, obtivemos  $P = 2723 \text{ W}$  por fase.



Para obter o valor da Potência Aparente, realizamos o cálculo da corrente RMS de entrada através do bloco RMS do Simulink, obtendo assim o valor de  $I_{rms} = 22.61A$ :

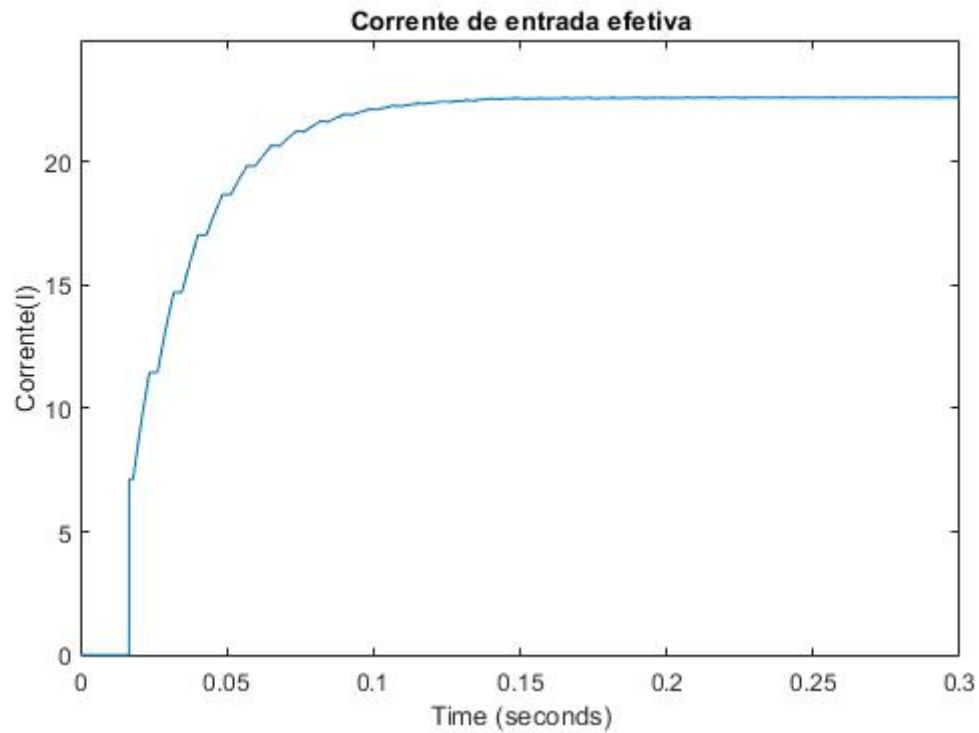


Figura 22: Corrente efetiva de entrada.

Assim, temos que o valor do fator de potência é:

$$fp = \frac{2723}{I_{rms} * V_{rms}} = \frac{2723}{2871} = 0.948 \quad (18)$$

## 5 Questão5

A modelagem do circuito no Simulink é dada por:

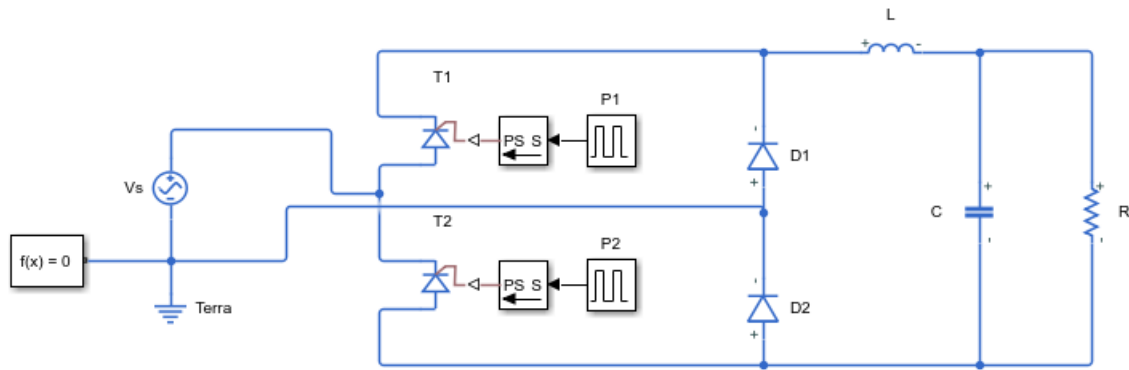


Figura 23: Circuito retificador semi-controlado

Temos os seguintes parametros para os componentes:

- $V_s = 220V$
- $L = 5H$
- $C = 100\mu F$
- $R = 19.1\Omega$

Para esses valores, obtemos uma corrente aproximadamente constante e próxima de 10A para um ângulo de disparo de  $0^\circ$ .

### 5.1 Item a

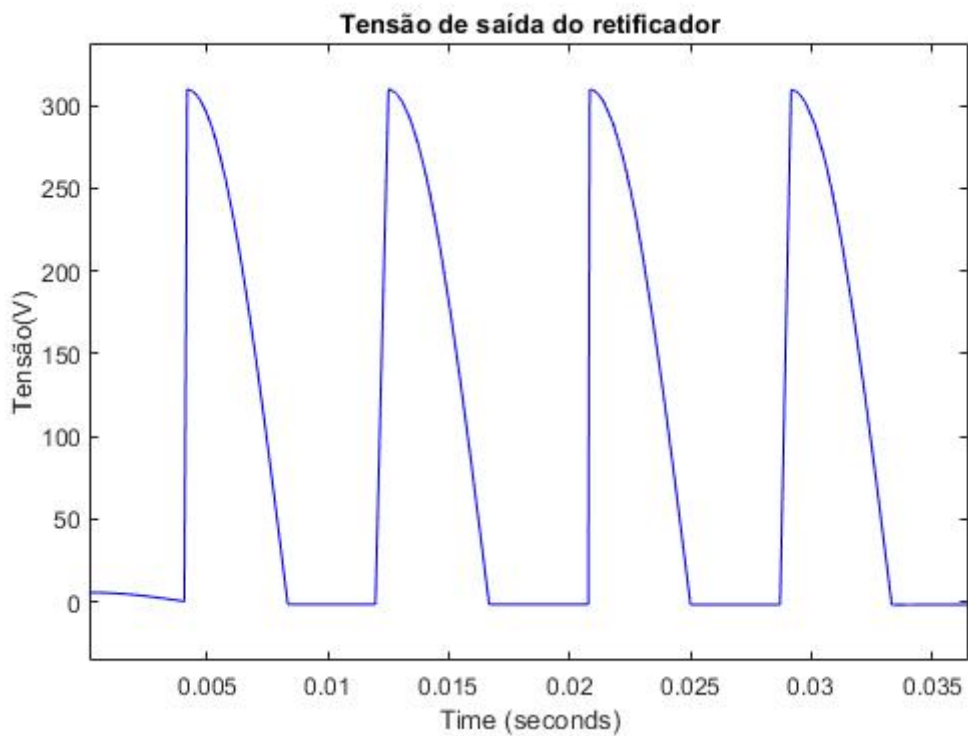


Figura 24: Tensão na saída do retificador

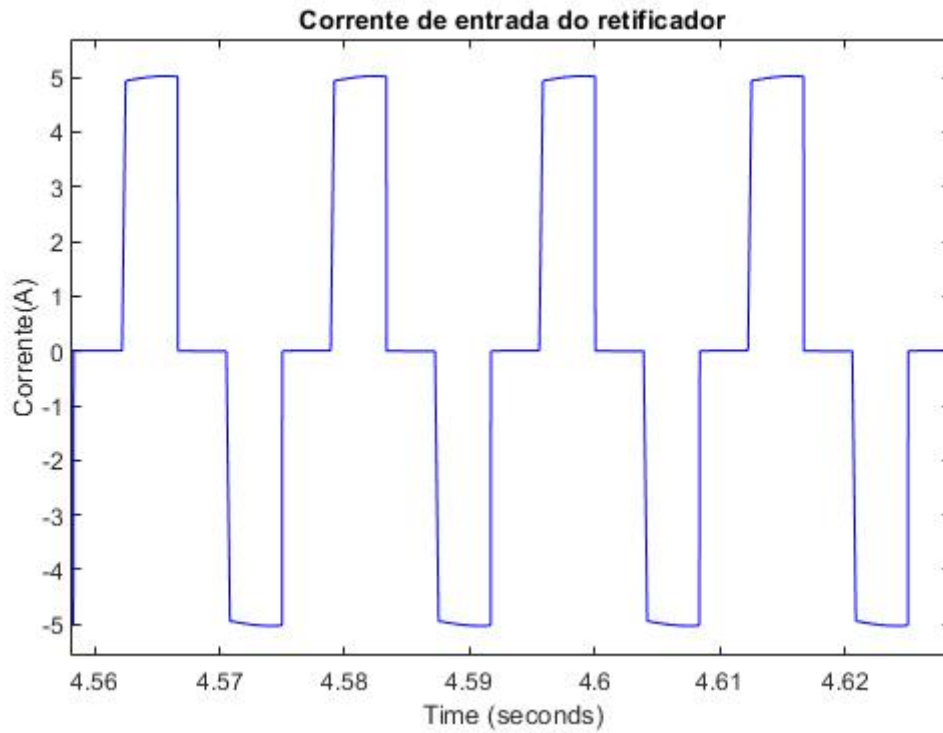


Figura 25: Corrente na entrada do retificador.

## 5.2 Item b

Para o retificador monofásico semi-controlado podemos obter a tensão média na carga por:

$$V_o = \frac{V_p(1 + \cos(\alpha))}{\pi}$$

Assim, resolvendo para  $V_o = 100V$ :

$$100 = \frac{220\sqrt{2}(1 + \cos(\alpha))}{\pi} \rightarrow \alpha = 89,4$$

Aplicando o valor na simulação:

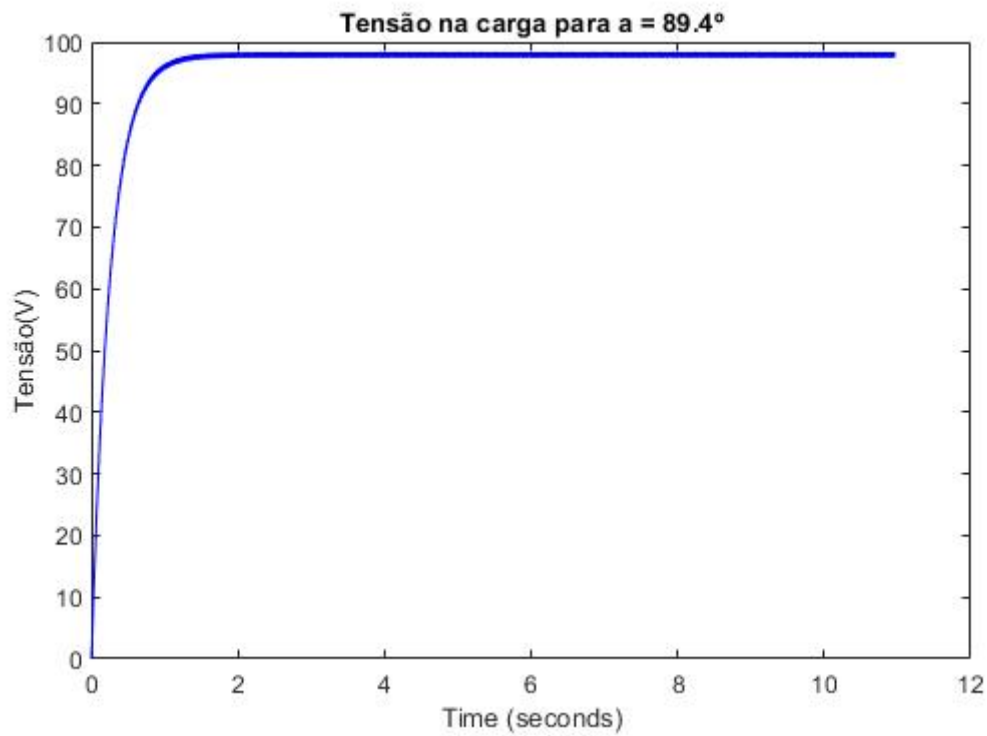


Figura 26: Tensão na carga.

O valor não chegou à exatos 100V devido à queda de tensão existente nos componentes reais.

### 5.3 Item c

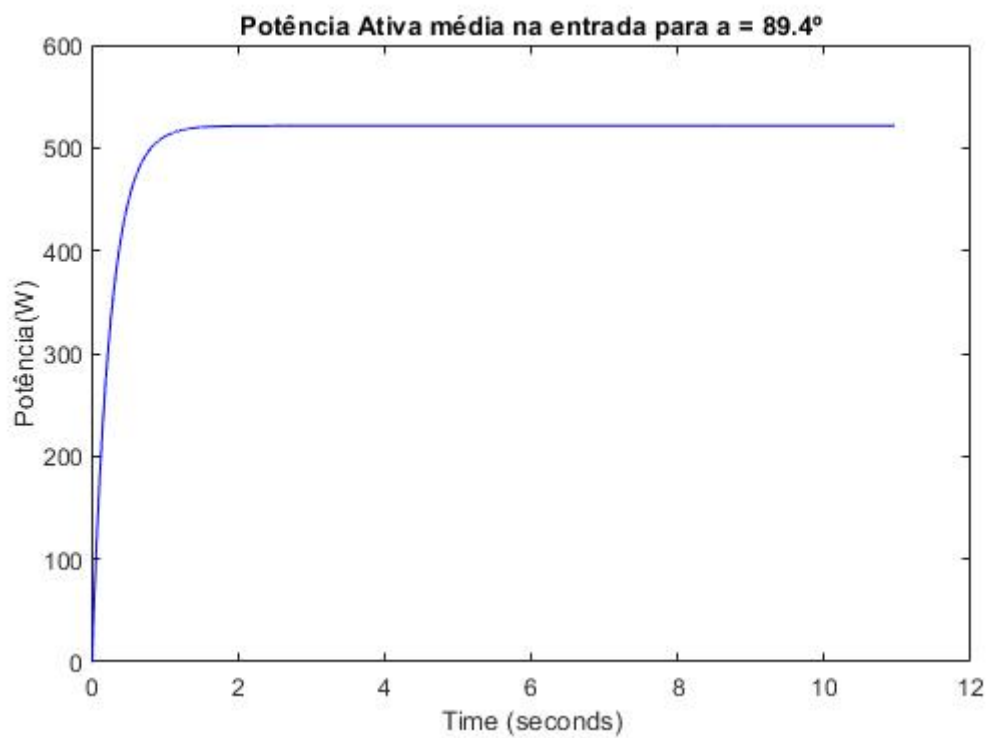


Figura 27: Potência Ativa média na entrada.

Realizando a média do produto entre corrente e tensão na entrada, inferimos que  $P = 521.5W$ . Assim, para o cálculo do fator de potência:

$$fp = \frac{521.5}{I_{rms} * V_{rms}} = \frac{521.5}{807.4} = 0.646 \quad (19)$$

## 6 Questão6

Para este exercício temos o circuito:

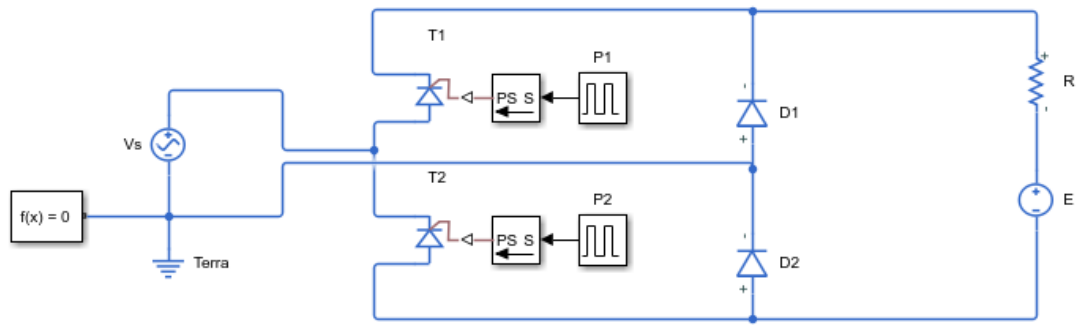


Figura 28: Retificador semi-controlado com bateria

### 6.1 a

Pelos dados fornecidos sabemos que a tensão de pico é dada por

$$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2} = 100 \cdot \sqrt{2} = 141.142V \quad (20)$$

É necessário encontrar o ângulo de disparo para o qual poderemos obter a tensão média aproximada no retificador:

$$\sin(\theta_1) = \frac{100}{141.2} \Rightarrow \theta = 0.785 \quad (21)$$

Assim, podemos obter o valor médio da tensão, através da formula derivada do valor médio:

$$V_o = \frac{2V_p(\cos(\theta_1) + \theta_1 \sin(\theta_1))}{\pi} = 113.67V \quad (22)$$

Facilmente podemos calcular  $I_o$  pelo calculo:

$$I_o = \frac{(V_o - E)}{R} = 12.42A \quad (23)$$

### 6.2 b

Os resultados obtidos através da simulação no MATLAB foram:

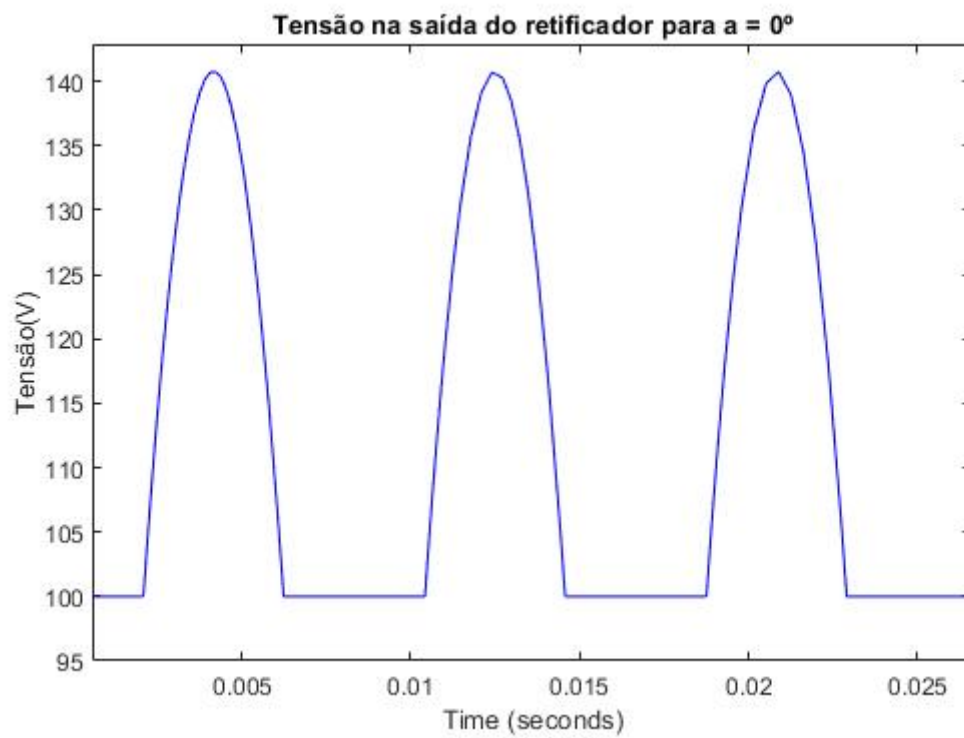


Figura 29: Tensão na saída do retificador para  $a = 0^\circ$ .

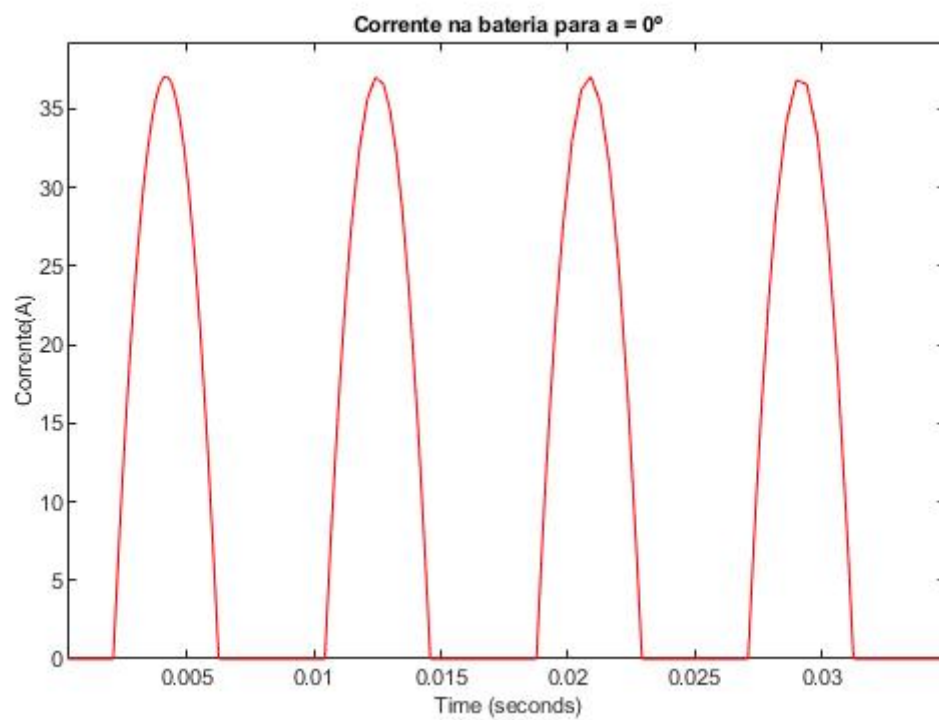


Figura 30: Corrente na saída do retificador para  $a = 0^\circ$ .

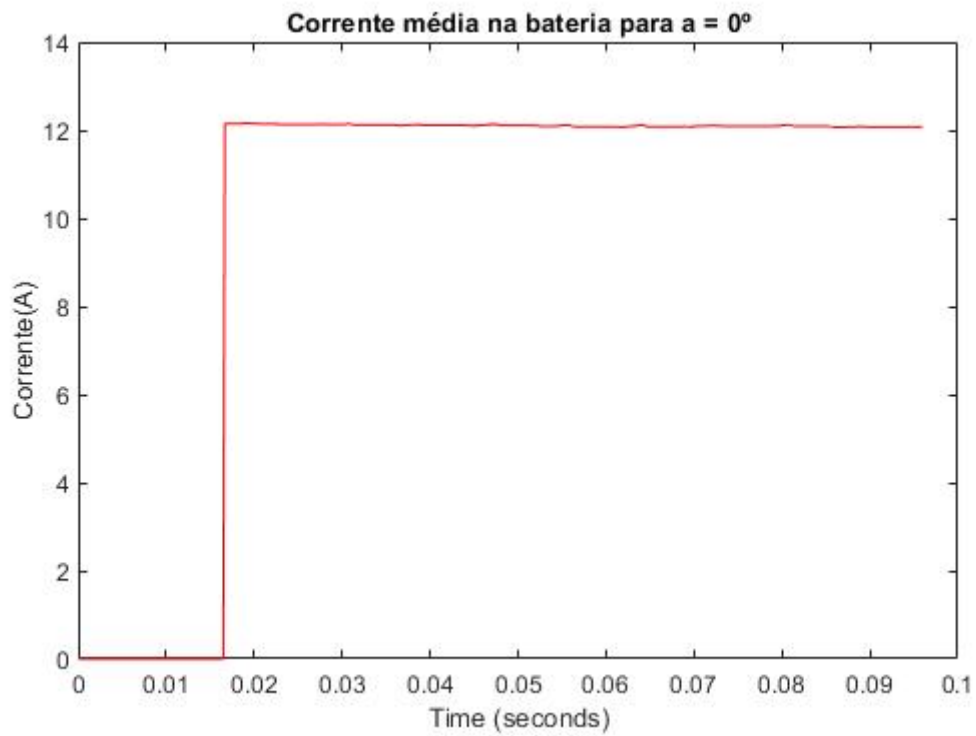


Figura 31: Corrente média na bateria para  $a = 0^\circ$ .

### 6.3 c

Para  $E = 60V$ , através da simulação obtemos o seguinte valor de tensão e corrente para o  $\alpha = 102.2$  o qual também foi encontrado por simulação:

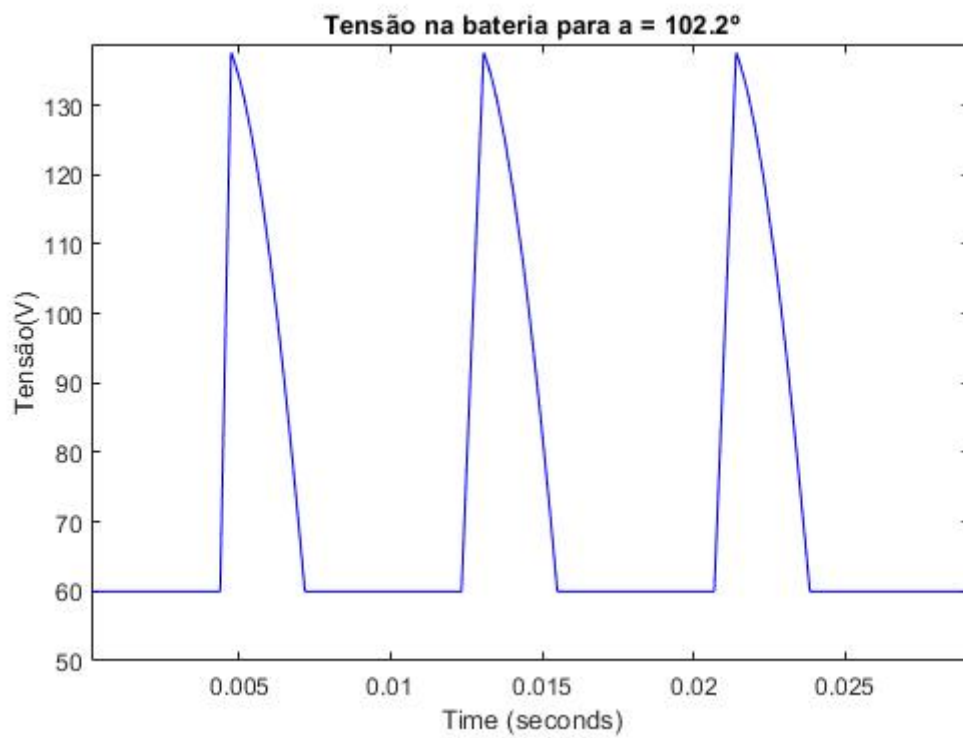


Figura 32: Tensão na bateria para  $a = 102.2^\circ$ .



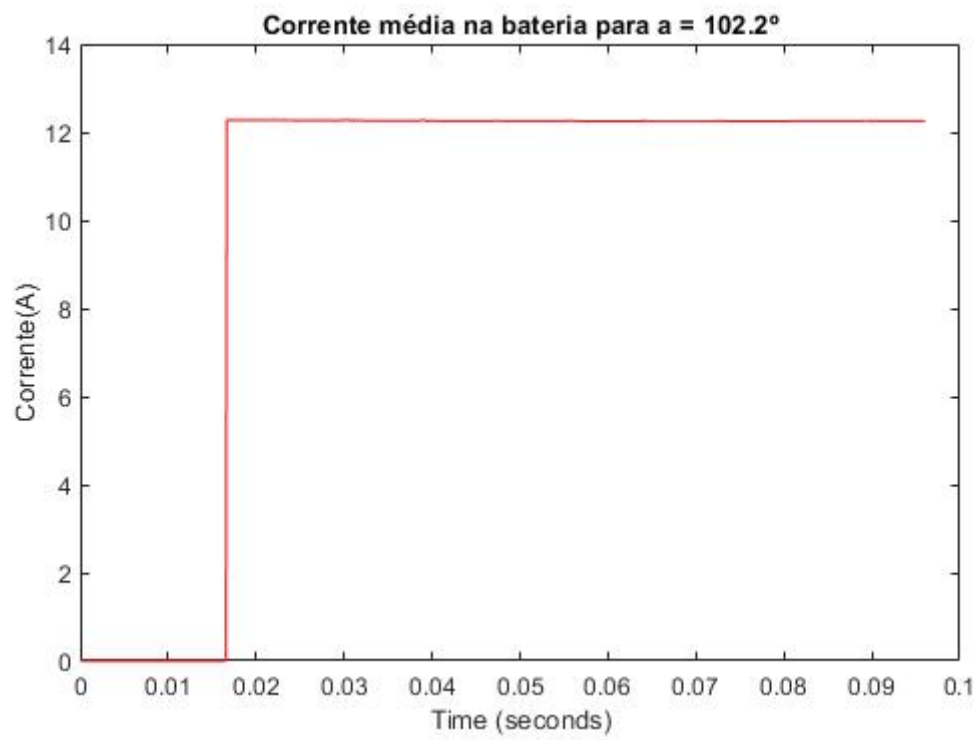


Figura 33: Corrente média na bateria para  $\alpha = 102.2^\circ$ .

## **7 Referências Bibliográficas**

SEN, P.C. “Principles of Electric Machines and Power Electronics” Wiley India Pvt. Limited, Second Edition, 2007.