



**SEMINÁRIO/TRABALHO DE SIMULAÇÕES DOS TESTES.**  
**CEL040-ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

**Aluno:** Dylan Soares de Vasconcelos Moreno - 202169003B.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO:	7
2. TESTE 1:	7
2.1. QUESTÃO 1:	7
3. TESTE 2:	16
3.1. QUESTÃO 3:	16
Letra a)	17
Letra b)	26
Letra c)	33
Letra d)	35
Letra e)	36
4. TESTE 3:	41
4.1. QUESTÃO 4:	41
5. TESTE 4:	44
5.1. QUESTÃO 2:	44
5.2. QUESTÃO 3:	53
Letra a)	55
Letra c)	59
Letra d)	60
Letra e) e Letra f)	62

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Dados e problemas da questão 01.....	7
Figura 2: Parâmetros do controle de simulação para as simulações dessa questão.....	7
Figura 3: Circuito Simulado do Teste 01. ....	8
Figura 4: Formas de ondas da corrente $I_0$ e tensão $V_s$ . ....	8
Figura 5: Potência Ativa Média na fonte $V_s$ .....	9
Figura 6: Formas de Ondas da corrente $I_0$ e tensão $V_{s2}$ .....	9
Figura 7: Potência Ativa Média na fonte de $V_{s2}$ .....	10
Figura 8: Formas de Ondas da corrente $I_0$ e $V_{s3}$ .....	10
Figura 9: Potência Ativa Média na fonte $V_{s3}$ .....	10
Figura 10: Formas de ondas corrente $I_0$ e tensão $V_{cc}$ . ....	11
Figura 11: Potência ativa média na fonte $V_{cc}$ . ....	11
Figura 12: Formas de ondas corrente $I_0$ e tensão $V_R$ .....	12
Figura 13: Potência ativa média no Resistor.....	12
Figura 14: Formas de ondas corrente $I_0$ e tensão $V_L$ . ....	12
Figura 15: Potência ativa média no indutor.....	13
Figura 16: Formas de ondas corrente $I_0$ e tensão $V_1$ . ....	13
Figura 17: Potência ativa média na fonte $V_1$ .....	13
Figura 18: Questão 01 parte I.....	14
Figura 19: Questão 01 parte II.....	15
Figura 20: Questão 01 parte III.....	16
Figura 21: Perguntas e dados da questão 03.....	16
Figura 22: Parâmetros do controle de simulação .....	17
Figura 23: Circuito Boost.....	17
Figura 24: Circuito de Controle do Chaveamento.....	18
Figura 25: Circuito Completo.....	18
Figura 26: Tensão e Corrente na Chave 12V, $D=0.4$ .....	19
Figura 27: Tensão $V_L$ . ....	19
Figura 28: Corrente $I_L$ . ....	20
Figura 29: $I_L$ médio.....	20

<b>Figura 30: Delta <math>I_L</math>.</b>	<b>21</b>
<b>Figura 31: Corrente <math>I_d</math>.</b>	<b>21</b>
<b>Figura 32: <math>I_d</math> médio.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 33: Tensão de Saída <math>V_0</math>.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 34: Corrente <math>I_C</math>.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 35: Corrente <math>I_R</math>.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 36: Corrente <math>I_0</math> médio.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 37: Cálculos realizados na 3 letra a.</b>	<b>24</b>
<b>Figura 38: Gráficos de Tensão de entrada e indutor, correntes da fonte do indutor.</b>	<b>24</b>
<b>Figura 39: Tensão <math>v_d</math>, <math>v_c</math> e correntes <math>i_d</math> e <math>i_c</math>.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 40: Corrente Média <math>I_R</math>.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 41: Circuito com a novo valor do resistor.</b>	<b>26</b>
<b>Figura 42: Tensão e Corrente na Chave ,12V <math>D=0.4</math>.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 43: Tensão <math>V_L</math>.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 44: Corrente do indutor.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 45: Valor médio da corrente no Indutor.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 46: Tensão <math>V_d</math>.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 47: Corrente no diodo.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 48: Valor médio da corrente no diodo.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 49: Tensão de Saída.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 50: Corrente no capacitor.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 51: Corrente no resistor.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 52: Valor médio da corrente no resistor.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 53: delta <math>I_L</math>.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 54: Letra b do teste.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 55: Resolução da letra c do teste 2.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 56: Circuito com a resistência de 138.88 <math>\Omega</math>.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 57: Corrente do indutor no modo condução contínua.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 58: Resolução da letra d.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 59: Circuito utilizado na simulação.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 60: Forma de onda na corrente do indutor em CCM.</b>	<b>36</b>

<b>Figura 61: Resolução da letra e do teste 2.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 62: Circuito Simulado 9V.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 63: Forma de onda indutor em CCM 9V.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 64: Potência em 9V.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 65: Gráfico de Tensão e Corrente na chave 9V, <math>D=0.55</math>.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 66: Circuito simulado 15V.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 67: Forma de onda do indutor em CCM 15V.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 68: Potência em 15V.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 69: Tensão e Corrente na Chave 15V <math>D=0.25</math>.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 70: Dados e parâmetros da questão.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 71: Circuito e controle de chaveamento.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 72: Parâmetros do controle de simulação utilizados.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 73: Resolução da questão 4 do teste 3.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 74: Forma de onda da corrente na carga.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 75: THDi da corrente fundamental.</b>	<b>43</b>
<b>Figura 76: Forma de onda da tensão na carga.</b>	<b>43</b>
<b>Figura 77: Dados da questão 2 do teste 4.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 78: Circuito Simulado.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 79: Controle de simulação.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 80: Forma de onda da tensão e corrente da carga.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 81: Forma de onda da corrente <math>I_s</math>.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 82: Valor da corrente <math>I_s</math> RMS.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 83: Forma de onda da corrente do diodo D2.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 84: Forma de onda da corrente do diodo D3.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 85: Forma de onda da corrente do diodo D4.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 86: Forma de onda da corrente do diodo D5.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 87: Formas de onda da tensão e corrente na fonte</b>	<b>49</b>
<b>Figura 88: Fator de Potência.</b>	<b>49</b>
<b>Figura 89: Potência ativa do lado CC.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 90: Potência ativa do lado CA.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 91: Resolução da questão 2 do teste 4 parte I</b>	<b>51</b>
<b>Figura 92: Resolução da questão 2 do teste 4 parte II.</b>	<b>51</b>

<b>Figura 93: Resolução da questão 2 do teste 4 parte III.</b>	<b>52</b>
<b>Figura 94: Corrente <math>I_{s1}</math> de pico na FFT.</b>	<b>52</b>
<b>Figura 95: Potência Aparente da carga</b>	<b>53</b>
<b>Figura 96: Dados da questão 3 do teste 4.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 97: Circuito Simulado.</b>	<b>54</b>
<b>Figura 98: Parâmetros de simulação.</b>	<b>54</b>
<b>Figura 99: Resolução da questão 3 do teste 4, letra a).</b>	<b>55</b>
<b>Figura 100: Forma de onda da tensão <math>V_d</math>.</b>	<b>55</b>
<b>Figura 101: Forma de onda da corrente de linha <math>I_a</math>.</b>	<b>56</b>
<b>Figura 102: Forma de onda da corrente de linha <math>I_b</math>.</b>	<b>56</b>
<b>Figura 103: Forma de onda da corrente de linha <math>I_c</math>.</b>	<b>56</b>
<b>Figura 104: Formas de onda das correntes dos diodos D1, D3 e D5.</b>	<b>57</b>
<b>Figura 105: Formas de onda das correntes dos diodos D2, D4 e D6.</b>	<b>57</b>
<b>Figura 106: Formas de onda das correntes dos diodos D1, D2, D3, D4, D5 e D6.</b>	<b>58</b>
<b>Figura 107: Resolução da questão 3 do teste 4, letra b).</b>	<b>58</b>
<b>Figura 108: Valor médio simulado da tensão <math>V_d</math>.</b>	<b>58</b>
<b>Figura 109: Resolução da questão 3 do teste 4, letra c).</b>	<b>59</b>
<b>Figura 110: Valor da corrente <math>I_a</math> RMS.</b>	<b>59</b>
<b>Figura 111: Resolução da questão 3 do teste 4, letra d).</b>	<b>60</b>
<b>Figura 112: FFT da corrente <math>I_a</math> em escala linear.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 113: Valor da corrente <math>I_{a1}</math> simulada.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 114: FFT da Tensão <math>V_d</math> em escala linear.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 115: Resolução da questão 3 do teste 4, letra e) e a letra f).</b>	<b>62</b>
<b>Figura 116: Formas de Onda de <math>V_{an}</math> e <math>I_a</math>.</b>	<b>62</b>
<b>Figura 117: Potência Ativa média de <math>V_{an}</math>.</b>	<b>63</b>
<b>Figura 118: Formas de onda da tensão <math>V_d</math> e corrente <math>I_d</math>.</b>	<b>63</b>
<b>Figura 119: Potência Ativa média da carga.</b>	<b>63</b>

## 1. INTRODUÇÃO:

O trabalho tem como o objetivo utilizar o aplicativo PSIM para simular os testes realizados durante o período. Para isso é necessário o conhecimento dos conteúdos relacionados à conceitos básicos de potência, conversores CC-CC (com foco no conversor boost), inversores de ponte completa e retificadores não controlados trifásicos. Através das simulações serão obtidas as ondas referentes as questões dos testes e comparado aos testes enviados ao longo do semestre, verificando se os resultados obtidos estão de acordo com o esperado ou não.

## 2. TESTE 1:

### 2.1. QUESTÃO 1:

#### Questão 1

Na Figura 1 a tensão que alimenta o circuito é dada por  $v_s(t) = 50 + 10 \cos(4\pi 60t) + 5 \cos(8\pi 60t)$ . Determine a potência ativa média absorvida por cada elemento. Simule o circuito no PSIM e compare os resultados.

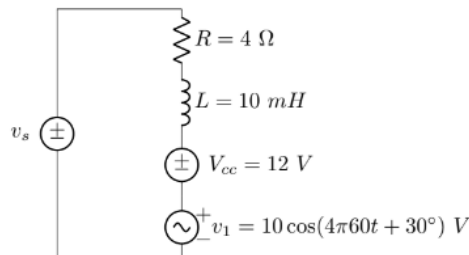


Figura 1: Circuito questão 1

Figura 1: Dados e problemas da questão 01.

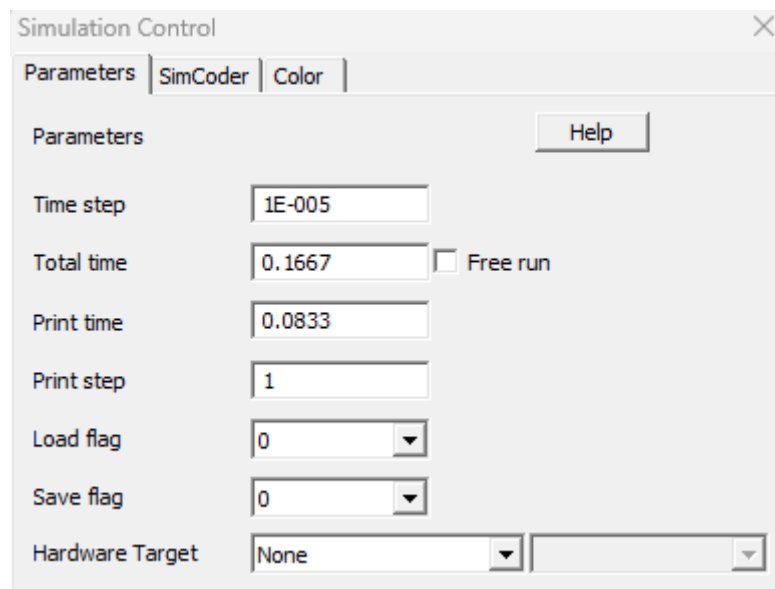
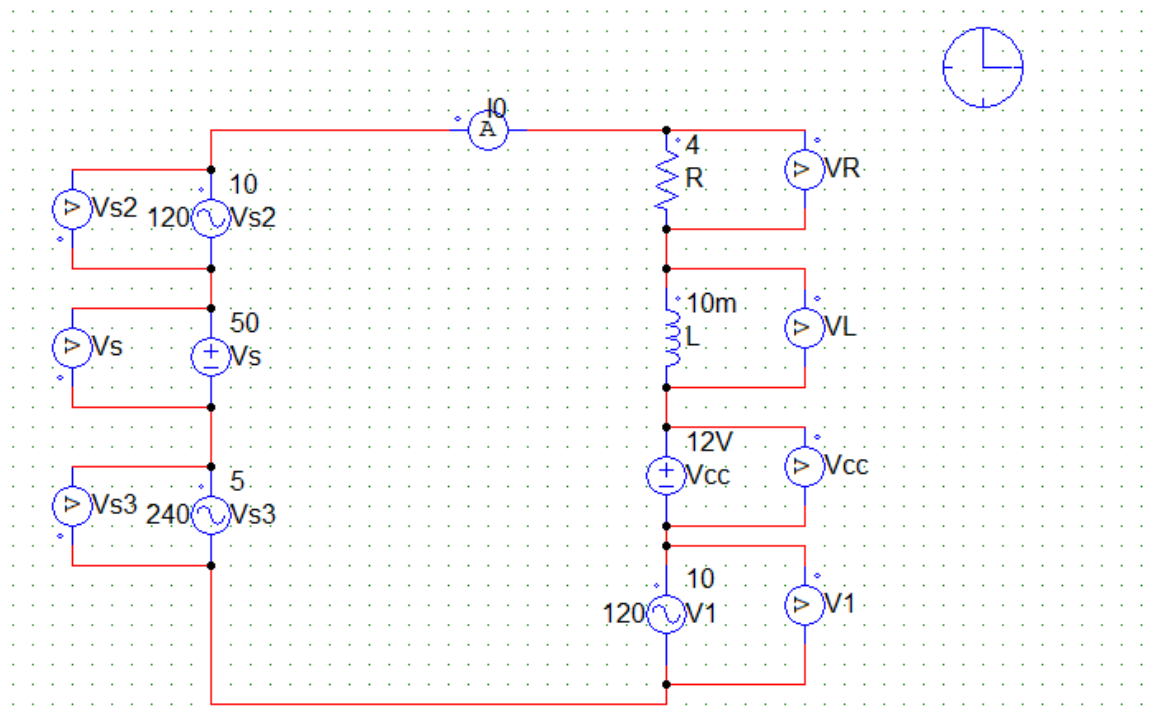
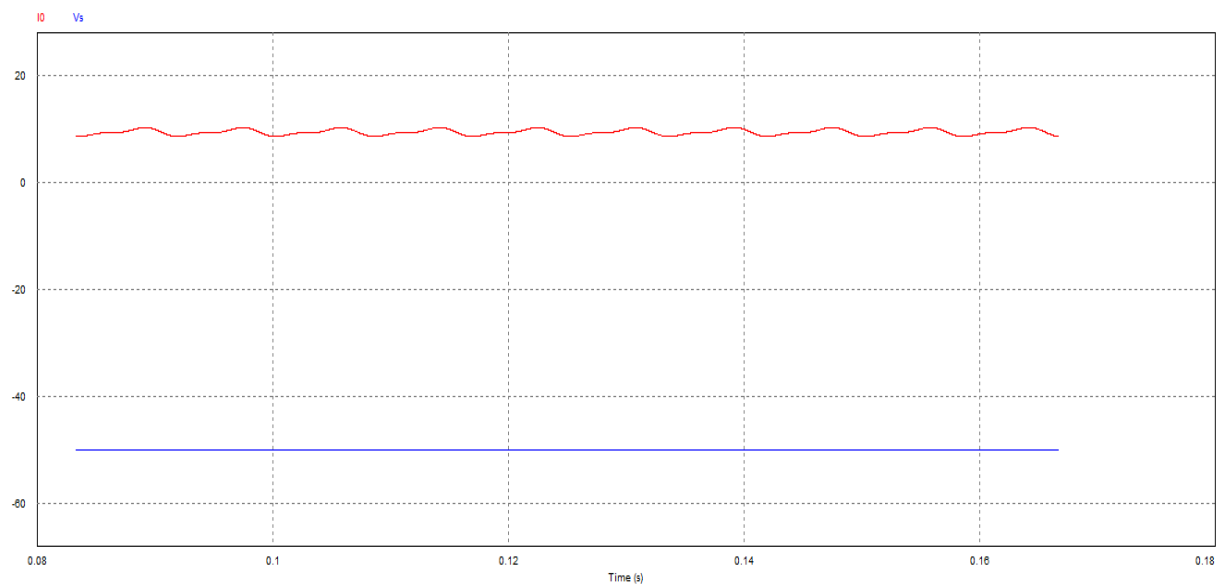


Figura 2: Parâmetros do controle de simulação para as simulações dessa questão.



**Figura 3: Circuito Simulado do Teste 01.**

Para fins de comparação foi colocado os voltmíetros no simulador PSIM de forma a atender as resoluções feitas no teste.

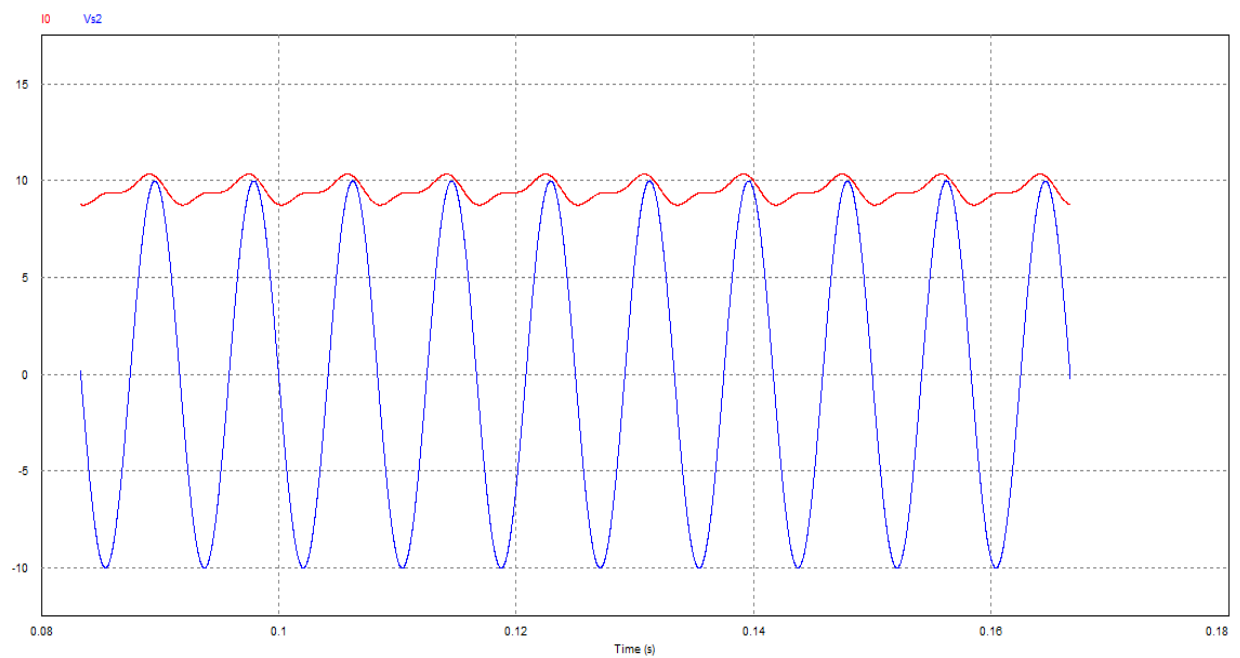


**Figura 4: Formas de ondas da corrente  $I_0$  e tensão  $V_s$ .**



Real Power			x
Time	From	8.3310000e-002	
Time	To	1.6670000e-001	
I0 vs. Vs		-4.7497029e+002	

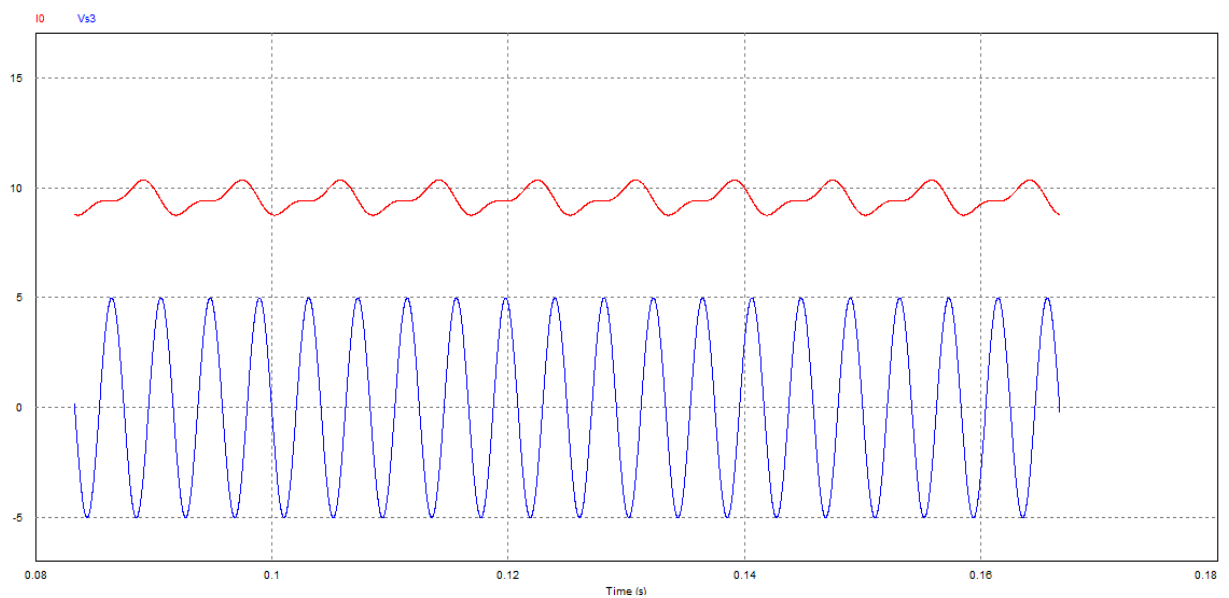
**Figura 5: Potência Ativa Média na fonte Vs.**



**Figura 6: Formas de Ondas da corrente I0 e tensão Vs2.**

Real Power			<input type="button" value="x"/>
Time	From	8.3310000e-002	
Time	To	1.6670000e-001	
I0 vs. Vs2		2.2176269e+000	

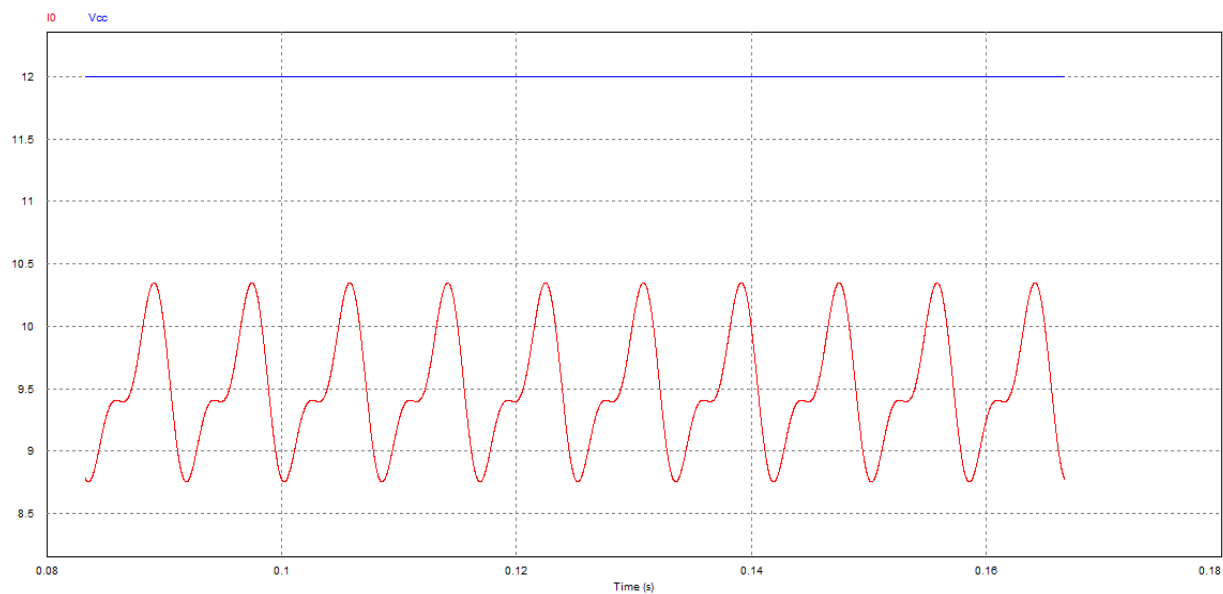
**Figura 7: Potência Ativa Média na fonte de Vs2.**



**Figura 8: Formas de Ondas da corrente I0 e Vs3.**

Real Power			<input type="button" value="x"/>
Time	From	8.3310000e-002	
Time	To	1.6670000e-001	
I0 vs. Vs3		-2.0551947e-001	

**Figura 9: Potência Ativa Média na fonte Vs3.**



**Figura 10: Formas de ondas corrente I0 e tensão Vcc.**

Real Power			x
Time	From	8.3310000e-002	
Time	To	1.6670000e-001	
I0 vs. Vcc		1.1399300e+002	

**Figura 11: Potência ativa média na fonte Vcc.**

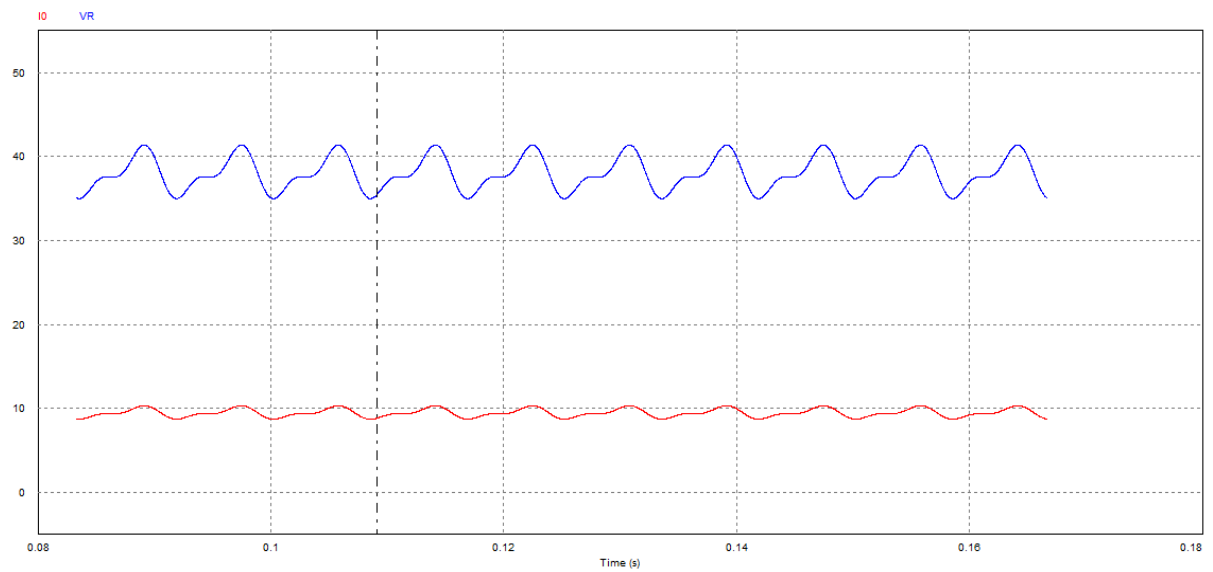


Figura 12: Formas de ondas corrente I0 e tensão VR.

Real Power		
Time	From	8.3310000e-002
Time	To	1.6670000e-001
I0 vs. VR		3.6189709e+002

Figura 13: Potência ativa média no Resistor.

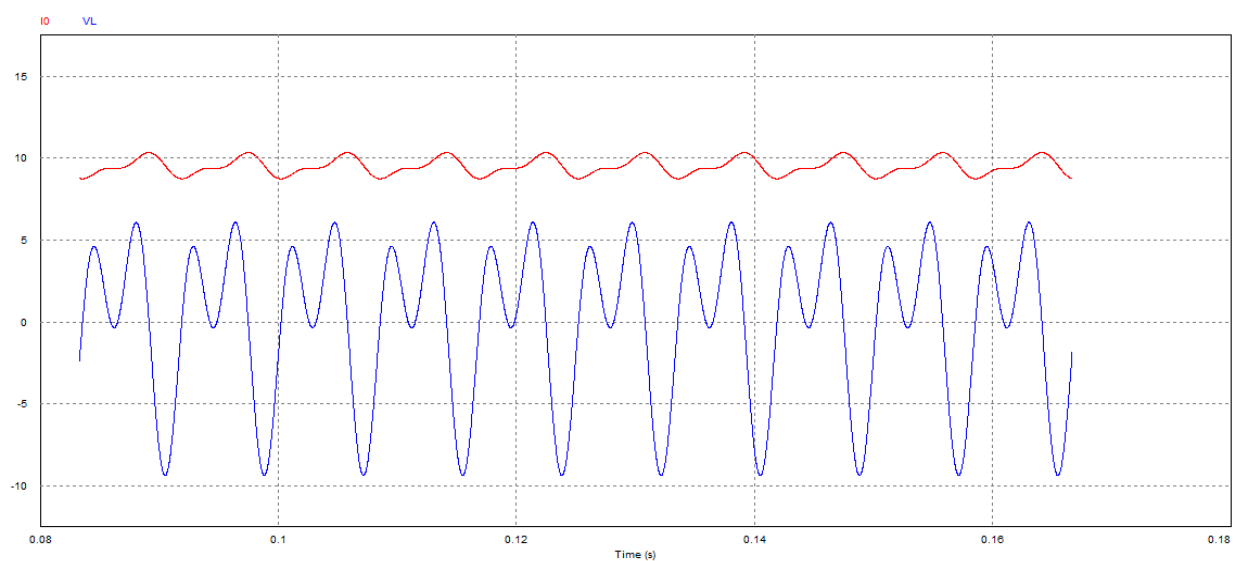


Figura 14: Formas de ondas corrente I0 e tensão VL.

Real Power				
Time	From		8.3310000e-002	
Time	To		1.6670000e-001	
I0 vs. VL			-1.4461433e-002	

Figura 15: Potência ativa média no indutor.

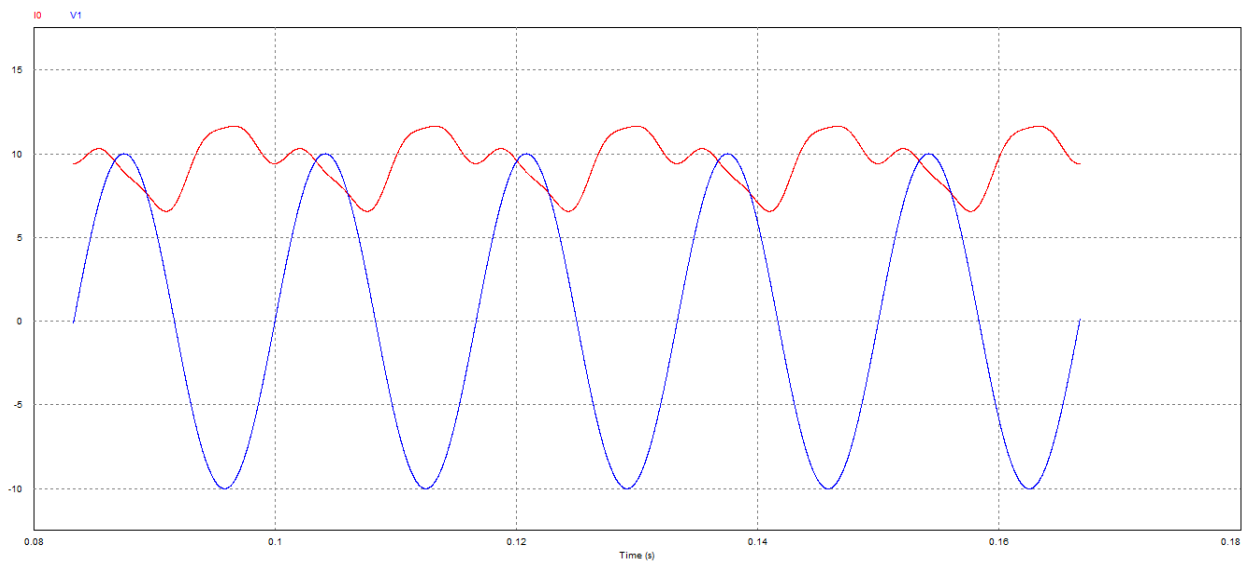


Figura 16: Formas de ondas corrente I0 e tensão V1.

Real Power				
Time	From		8.3310000e-002	
Time	To		1.6670000e-001	
I0 vs. V1			-2.9175360e+000	

Figura 17: Potência ativa média na fonte V1.

A seguir será apresentado as contas realizadas durante o Teste 1, sendo feito pelo método de superposição para a questão 01:

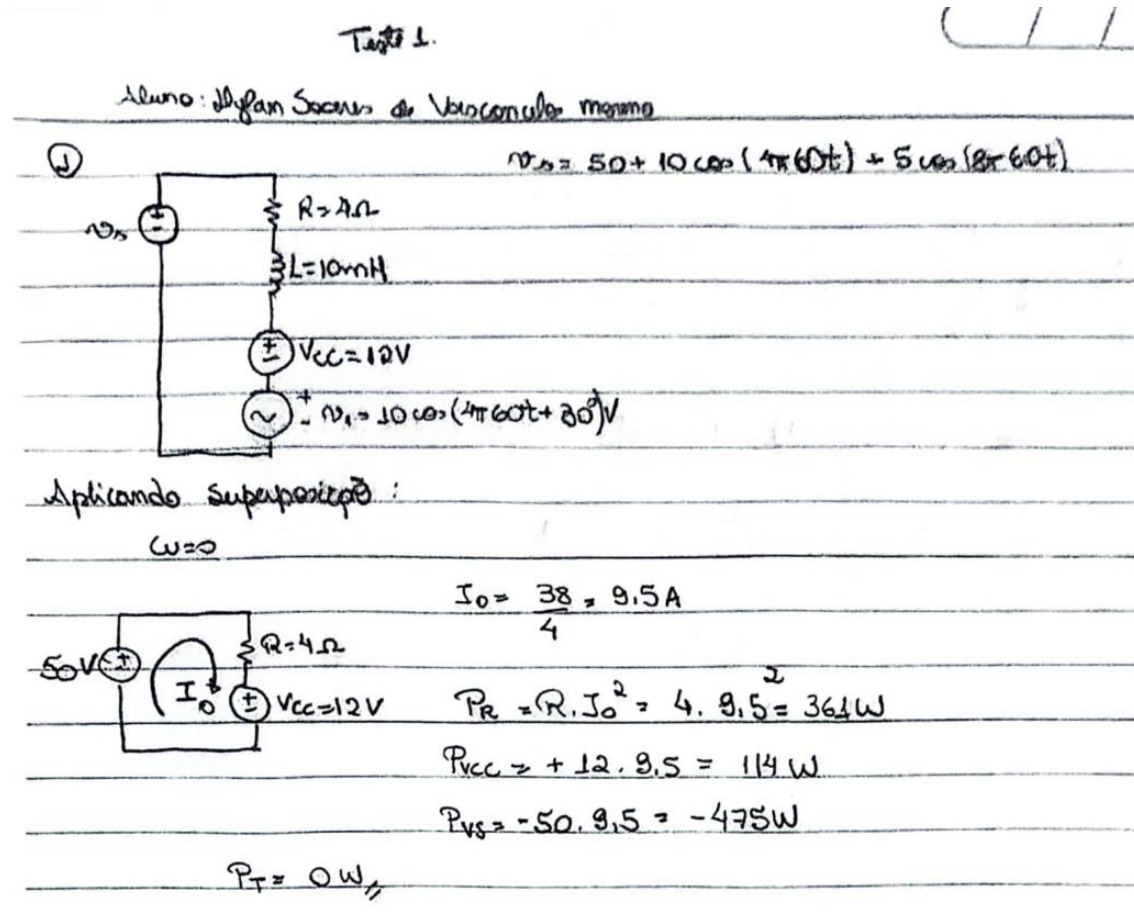


Figura 18: Questão 01 parte I.

Percebe-se que nas Figuras 17 e 18 há um erro ao calcular-se a corrente visto que ambas calculam seu fasor porém no momento de calcular a potência é esquecido de usar seu valor RMS (Root Means Square).

$\omega = 4\pi 60$

$$\vec{I}_1 = \frac{10\angle 0^\circ - 10\angle 30^\circ}{4 + j5.398} = 0.606 \angle -132^\circ$$

$$P_{Vs} = -(10\angle 0^\circ)(0.606) = -(6.06) \cos(137^\circ) = +4.43 \text{ W}$$

$$P_{Vs1} = (10\angle 30^\circ)(0.606) = 6.06 \cos(167^\circ) = -5.90 \text{ W}$$

$$P_R = 4 \cdot (0.606)^2 = 1.47 \text{ W} \quad P_L = 0 \text{ W}$$

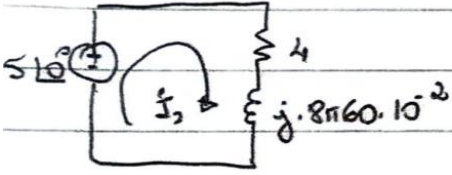
Figura 19: Questão 01 parte II.

Assim, a superposição com a frequência de  $\omega = 4\pi 60 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ , sendo a nomenclatura  $P_{Vs1} = P_{V1}$  acima, deveria apresentar as potências como:

$$P_{Vs} = -\frac{6.06}{2} \cos(137^\circ) = 2.21 \text{ W},$$

$$P_{V1} = \frac{6.06}{2} \cos(167^\circ) = -2.95 \text{ W},$$

$$P_R = \frac{4 \cdot 0.367236}{2} = 0.734 \text{ W}.$$

$$\omega = 8\pi 60$$


$$\vec{I}_2 = \frac{5\angle 0^\circ}{4 + j8\pi 60 \cdot 10^{-2}} = 0,3204 \angle -75^\circ$$

$$P_{V_S} = -(5 \cdot 0,3204) = -1,602 \text{ W} \cdot \cos(75^\circ) = -0,41 \text{ W}$$

$$P_R = 4 \cdot (0,3204)^2 = 0,410 \text{ W} \quad P_L = 0 \text{ W}$$

Figura 20: Questão 01 parte III.

Na frequência de  $\omega = 8\pi 60 \text{ rad/s}$  ocorre o mesmo erro ao serem utilizados os valores de pico.

$$P_{V_S} = \frac{1,602}{2} \cos(-75^\circ) = -0,207 \text{ W},$$

$$P_R = \frac{4 \cdot 0,1026}{2} = 0,205 \text{ W}$$

A partir das simulações, percebe-se que os valores obtidos são muito próximos dos calculados nos testes, esses quando estão calculados corretamente sem correção, além disso, levando em consideração aos valores corrigidos percebe-se que estão em paridade com a simulação.

### 3. TESTE 2:

#### 3.1. QUESTÃO 3:

##### Questão 3

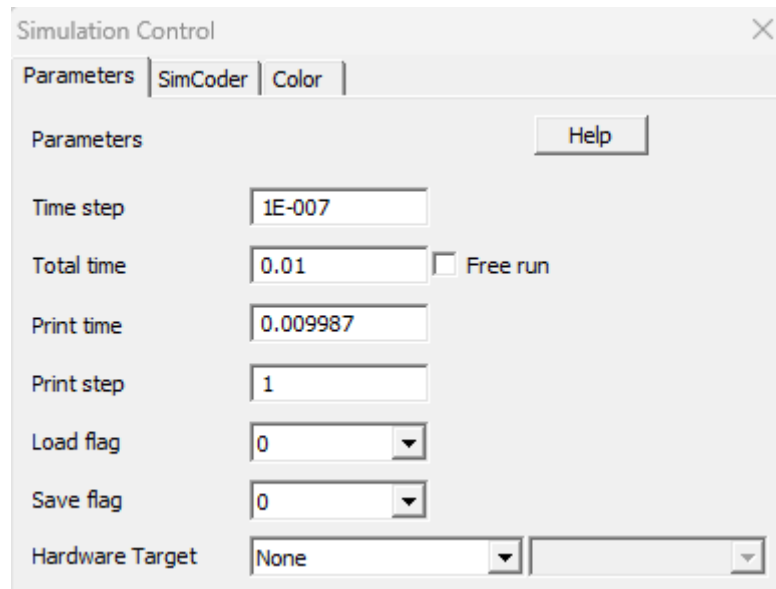
Um conversor boost com indutância  $L = 25 \mu\text{H}$  e capacitor grande o suficiente para garantir uma tensão de saída sem ondulações significativas, opera em estado permanente nas seguintes condições:  $V_{in} = 12 \text{ V}$ ,  $D = 0,4$ ,  $P_o = 25 \text{ W}$  e  $f_s = 400 \text{ kHz}$ .

- Calcule e desenhe as formas de onda de tensão e corrente em cada elemento do circuito.
- Desenhe as formas de onda de tensão e corrente no indutor se  $P_o = 15 \text{ W}$ . Compare com as formas de onda da letra (a).
- Calcule o valor crítico de  $P_o$  para a operação no modo de condução contínuo.
- Calcule o valor mínimo de  $L$  para que o conversor opere em CCM para  $P_o = 5 \text{ W}$ .
- A tensão de entrada varia em uma faixa de 9 a 15 V, para cada valor de entrada o ciclo de trabalho é ajustado para manter a tensão de saída no valor nominal. Calcule o valor mínimo de  $L$  para que o conversor opere em CCM para todos os valores de entrada e  $P_o = 40 \text{ W}$ .

Figura 21: Perguntas e dados da questão 03.



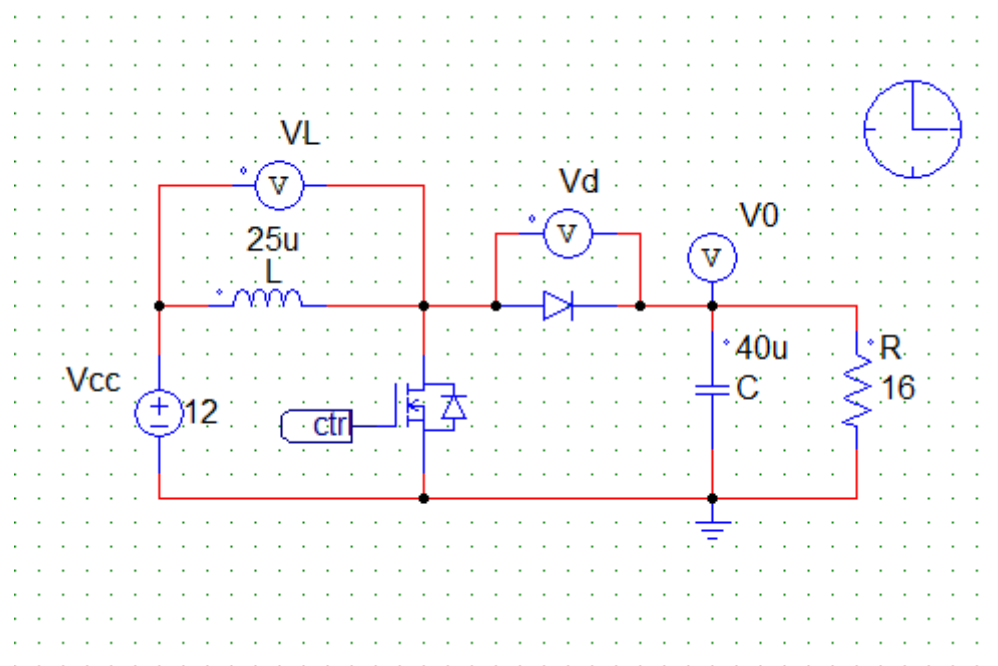
Em todas as simulações dessa questão o controle de simulação foi feito com as seguintes especificações:



**Figura 22: Parâmetros do controle de simulação**

**Letra a)**

Aqui é necessário obter todas as formas de onda a partir dos dados fornecidos na questão.



**Figura 23: Circuito Boost.**

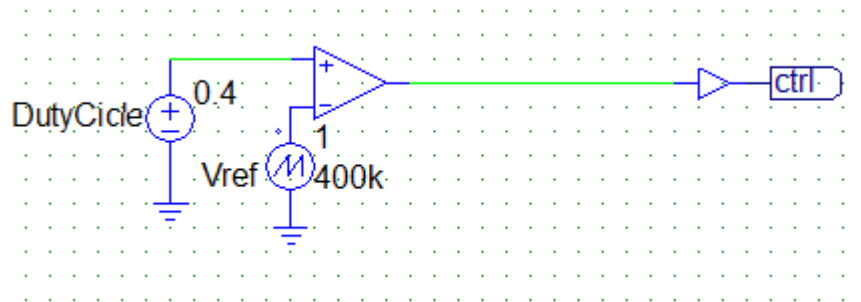


Figura 24: Circuito de Controle do Chaveamento.

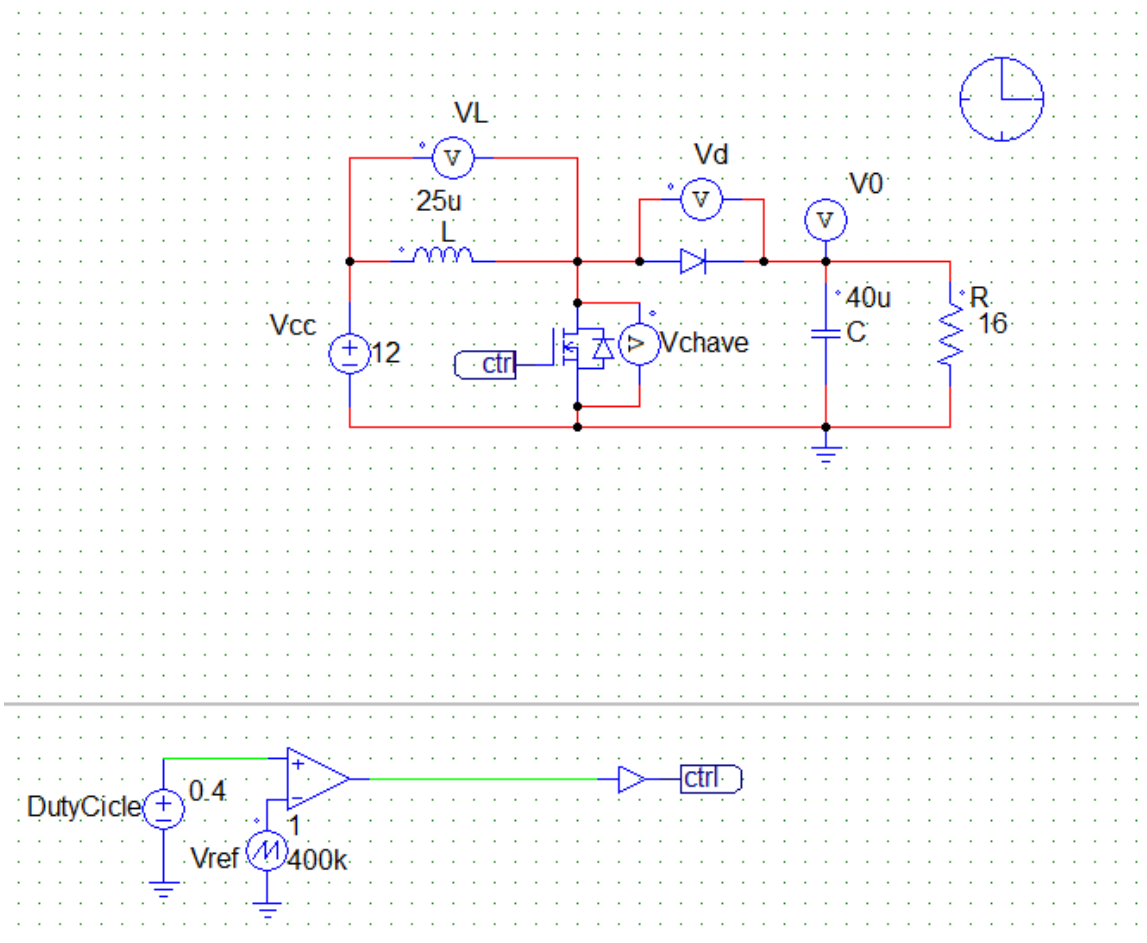
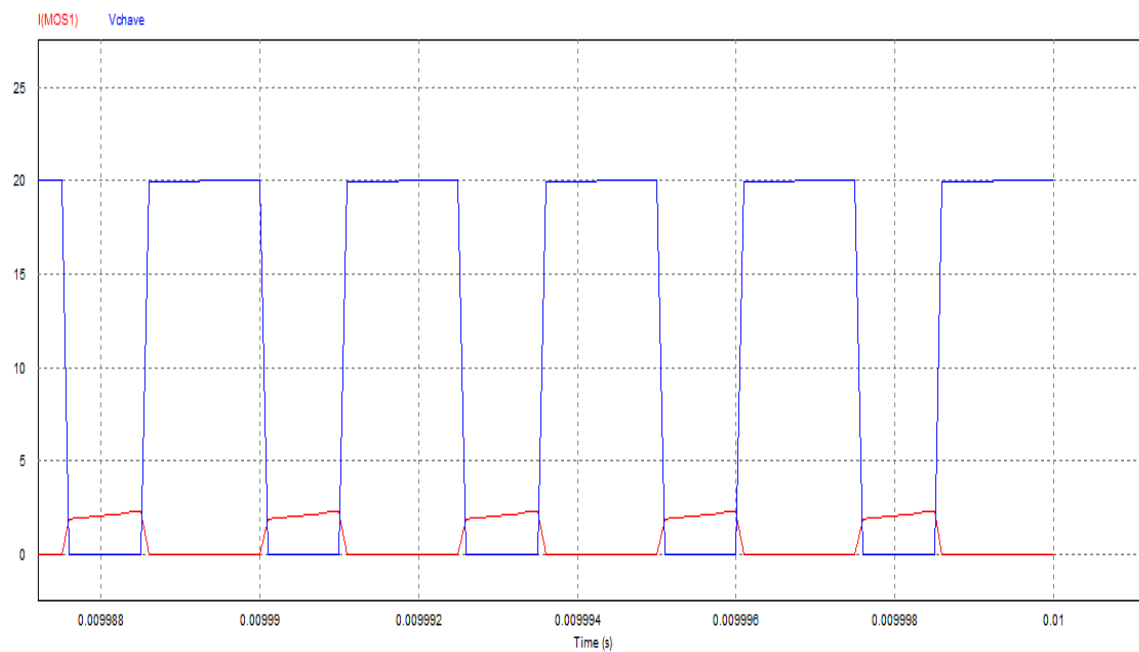
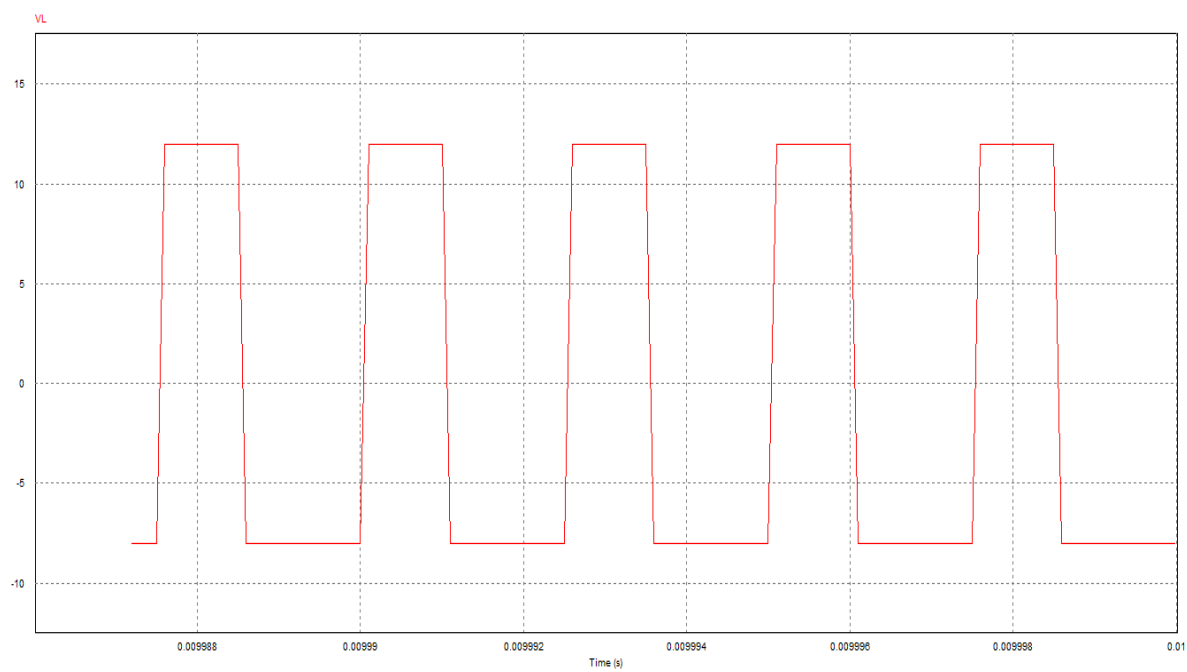


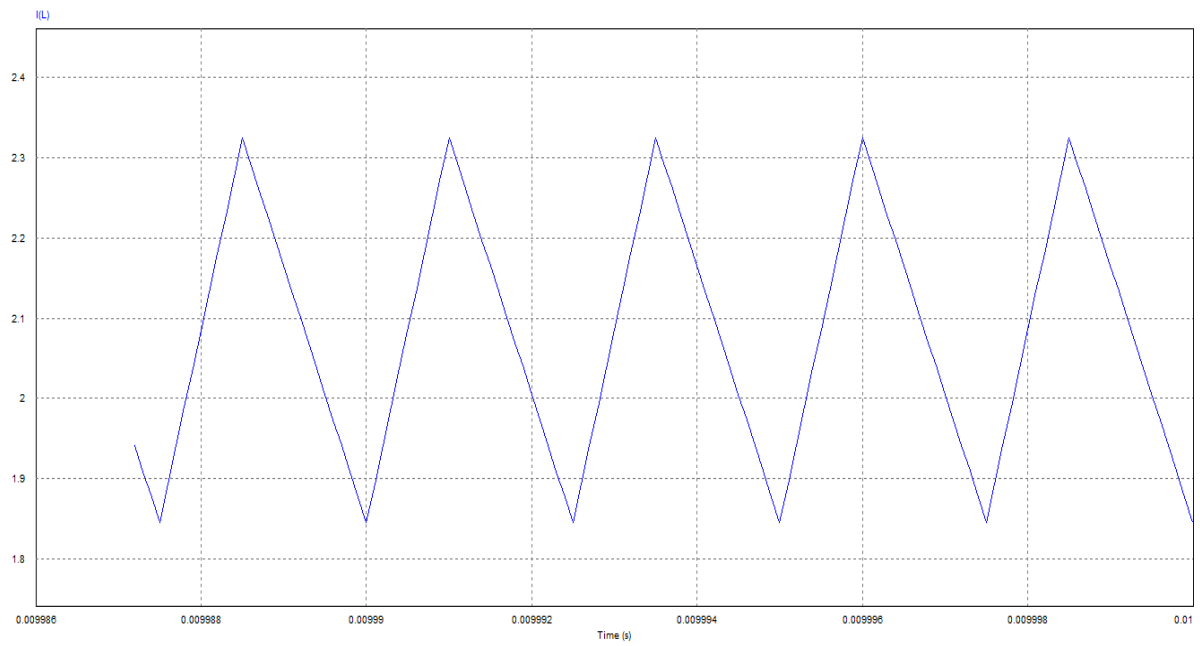
Figura 25: Circuito Completo.



**Figura 26: Tensão e Corrente na Chave 12V,  $D=0.4$**



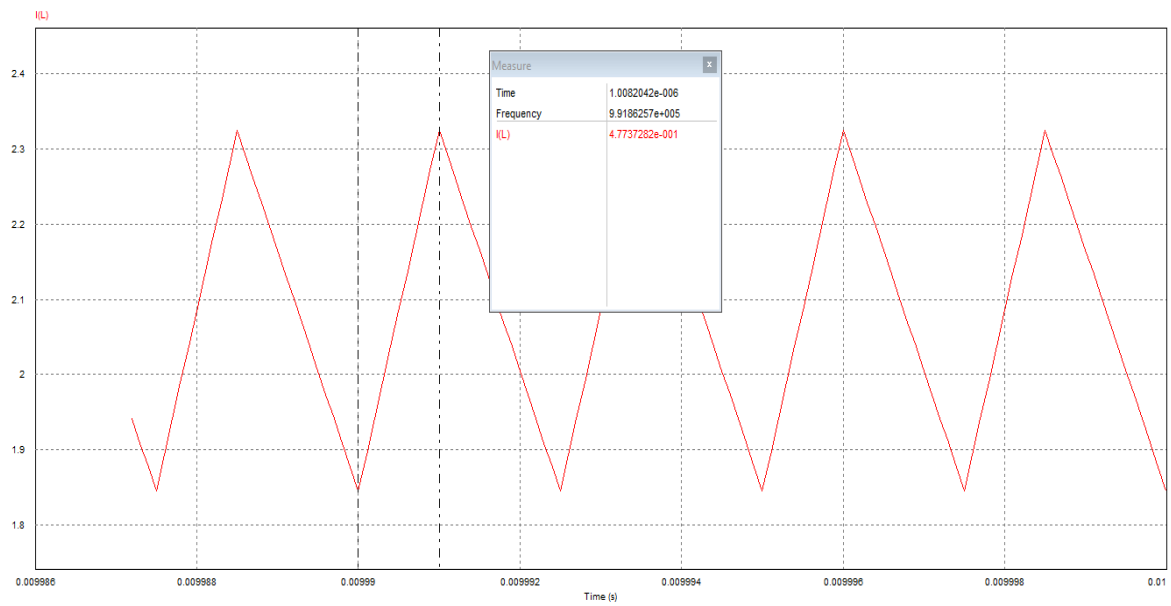
**Figura 27: Tensão  $V_L$ .**



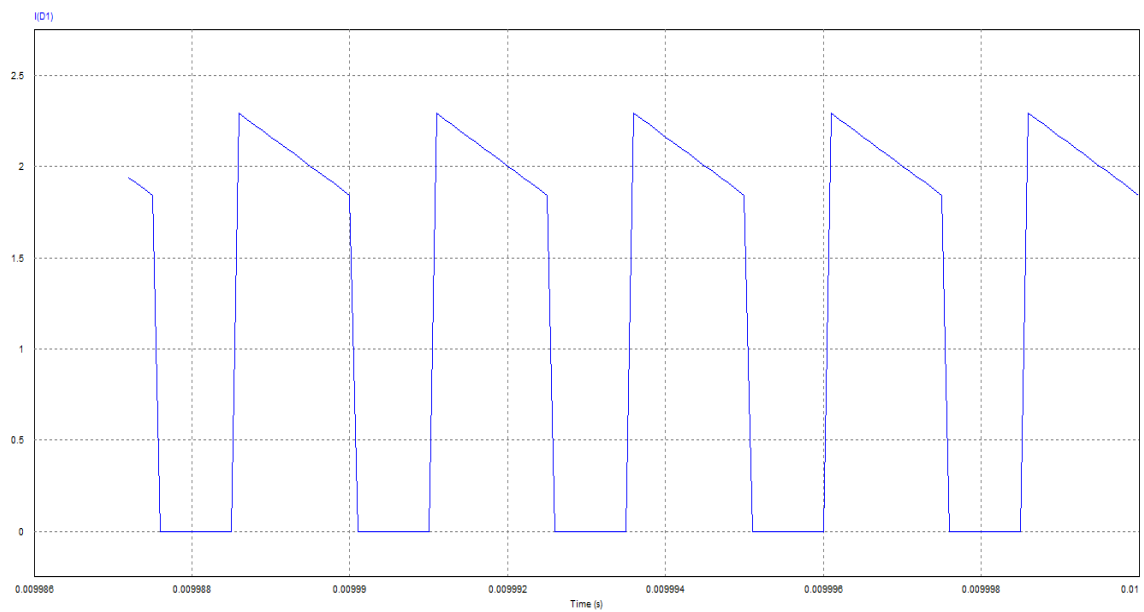
**Figura 28: Corrente IL.**

Average Value		x
Time	From	9.9872000e-003
Time	To	0.0000000e+000
I(L)		2.0790436e+000

**Figura 29: IL médio.**



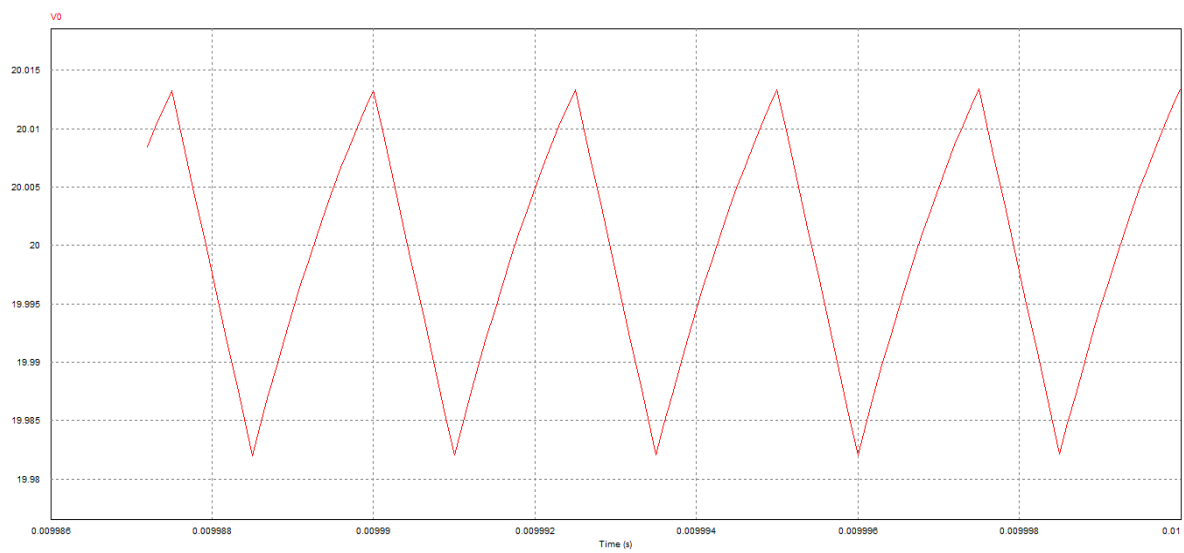
**Figura 30: Delta  $I_L$ .**



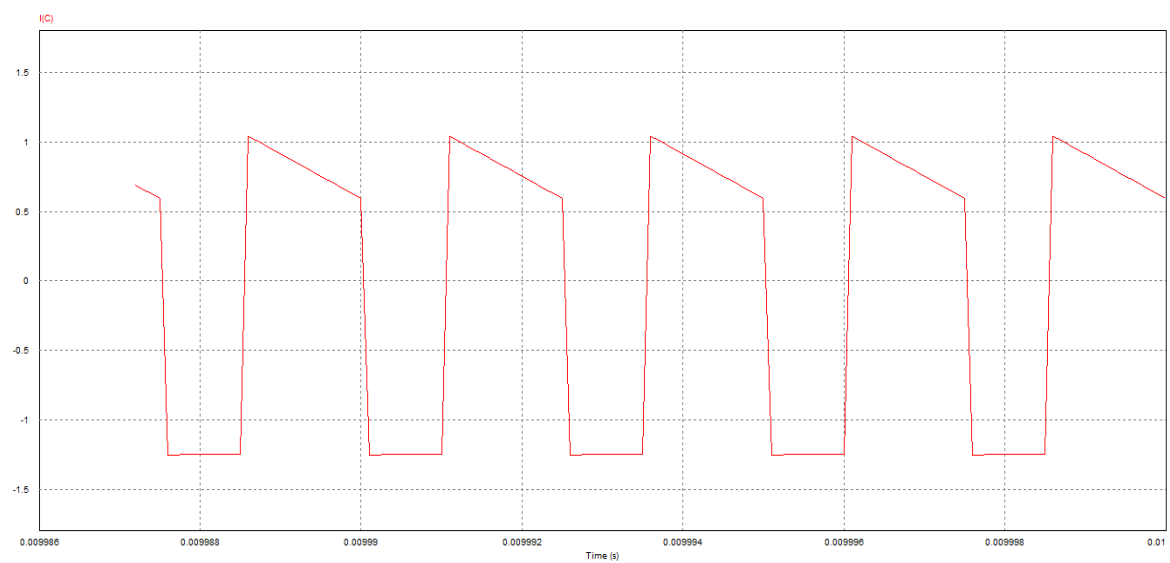
**Figura 31: Corrente  $I_d$ .**

Average Value			
Time	From	9.9872000e-003	
Time	To	0.0000000e+000	
I(D1)		1.2616410e+000	

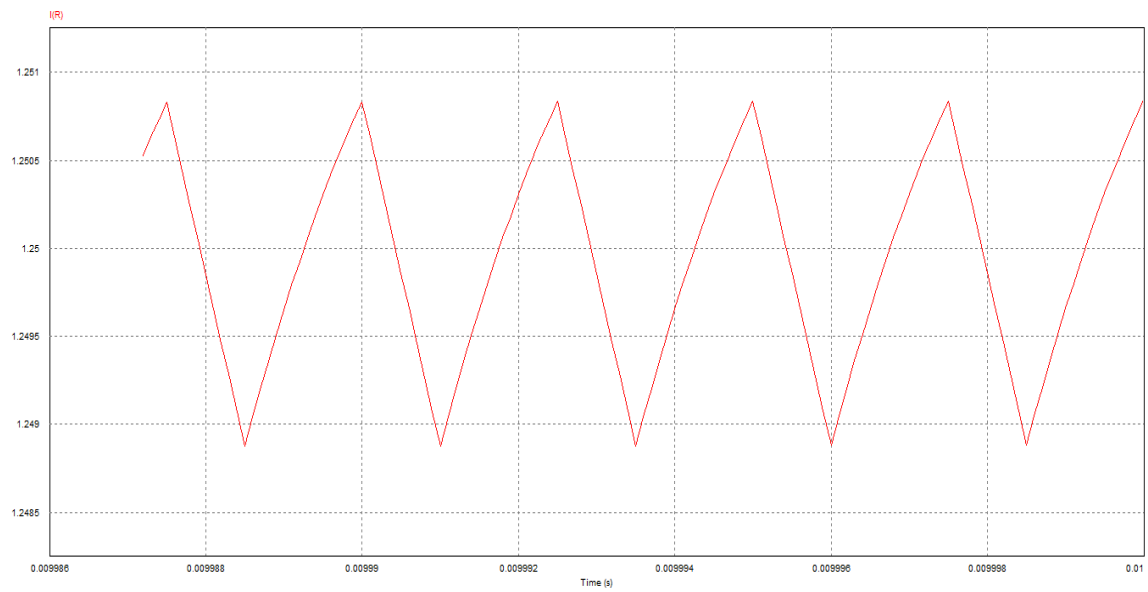
**Figura 32: Id médio.**



**Figura 33: Tensão de Saída V0.**



**Figura 34: Corrente IC**



**Figura 35: Corrente IR.**

Average Value		x
Time	From	9.9872000e-003
Time	To	0.0000000e+000
I(R)		1.2499360e+000

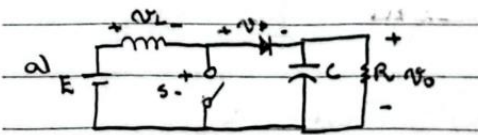
**Figura 36: Corrente IO médio.**

Abaixo segue a questão 3, letra a, feita no teste:

3)  $L = 25 \mu H$      $V_{in} = 12V$ ,  $D = 0,4$ ;  $P_o = 25W$ ,  $f_s = 400kHz$

Capacitância grande.

$T_s = \frac{1}{f_s} \Rightarrow 2,5 \mu s$



$V_o = V_{in} / (1-D)$

$V_o = 12 / 0,6 = 20V$

$P_o = V_o \cdot \bar{I}_o$      $V_o = R \cdot \bar{I}_o$

$25 = 20 \cdot \bar{I}_o$      $20 = R \cdot 1,25$

$\bar{I}_o = 1,25A = \bar{I}_R$      $R = 16\Omega$

$v_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}$      $v_L = E$

$\frac{E \cdot D T_s}{L} = \Delta i_L \Rightarrow \frac{12 \cdot 0,4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}}{102 \cdot 10^{-9}} = 0,48A$

Figura 37: Cálculos realizados na 3 letra a.

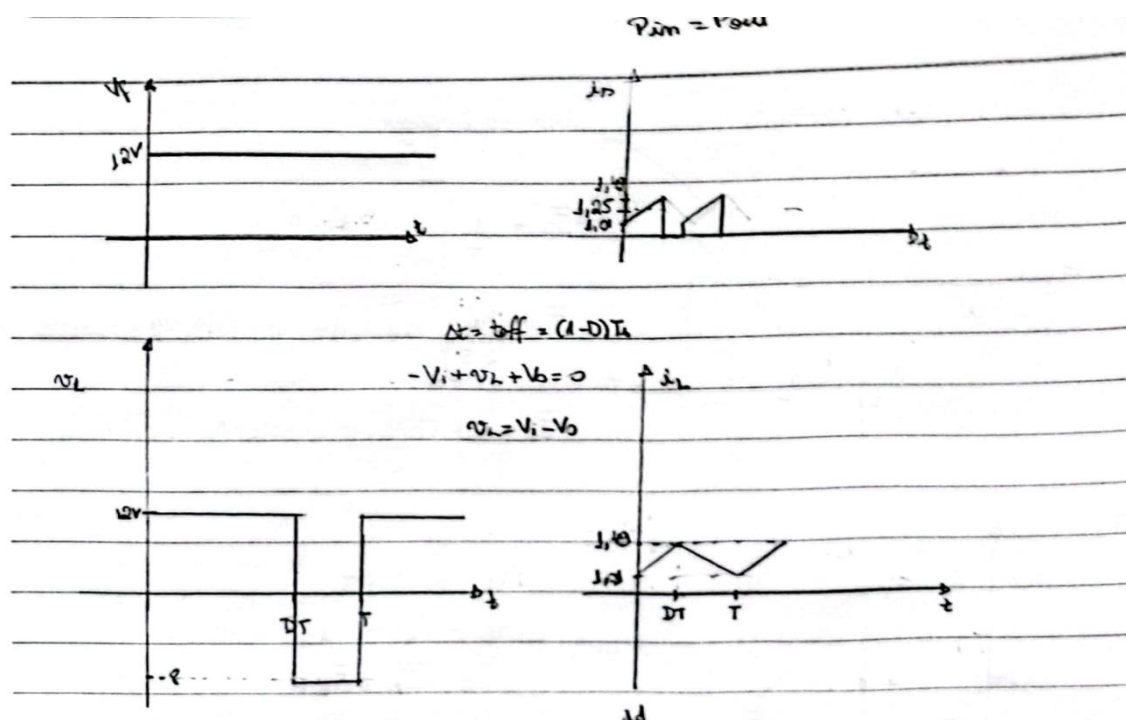


Figura 38: Gráficos de Tensão de entrada e indutor, correntes da fonte do indutor.



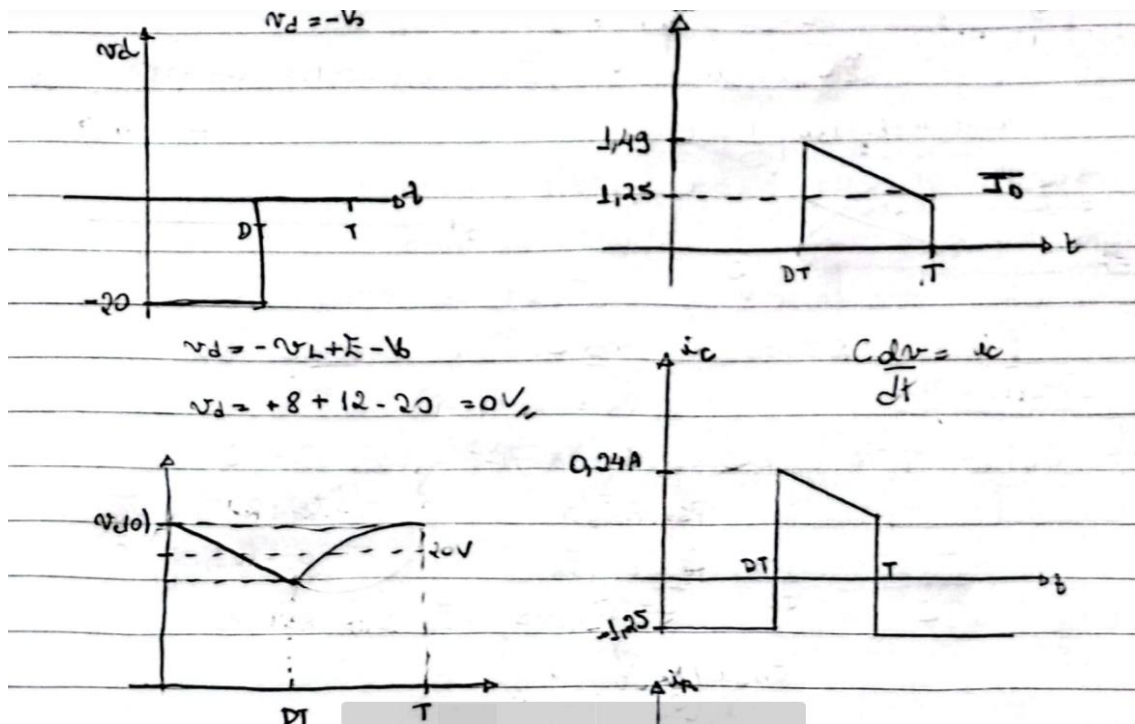


Figura 39: Tensão  $v_d$ ,  $v_c$  e correntes  $i_d$  e  $i_c$

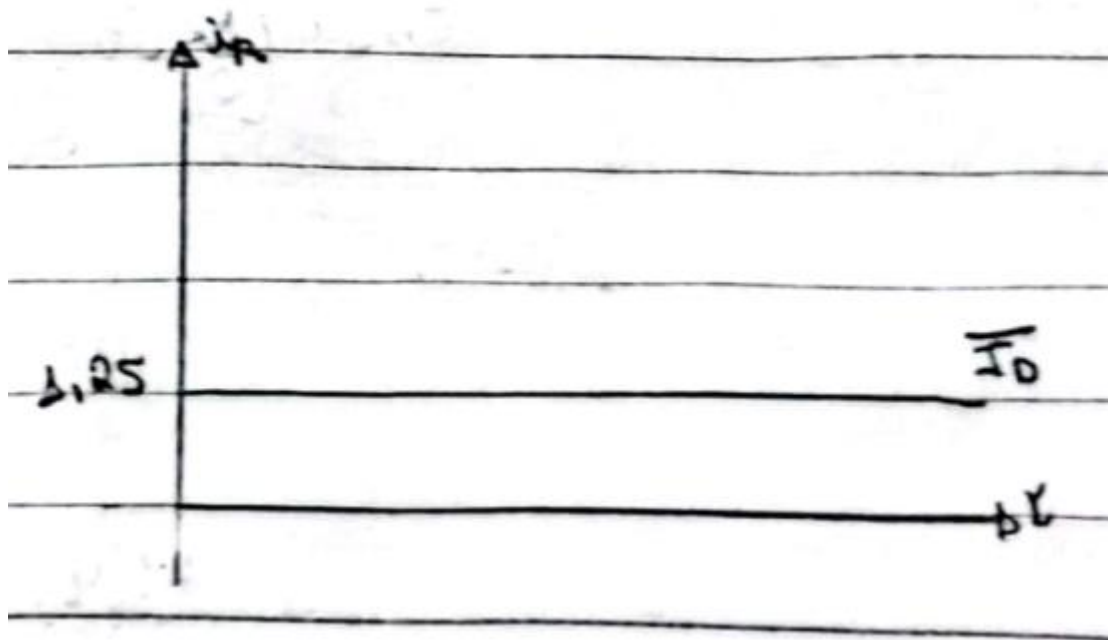
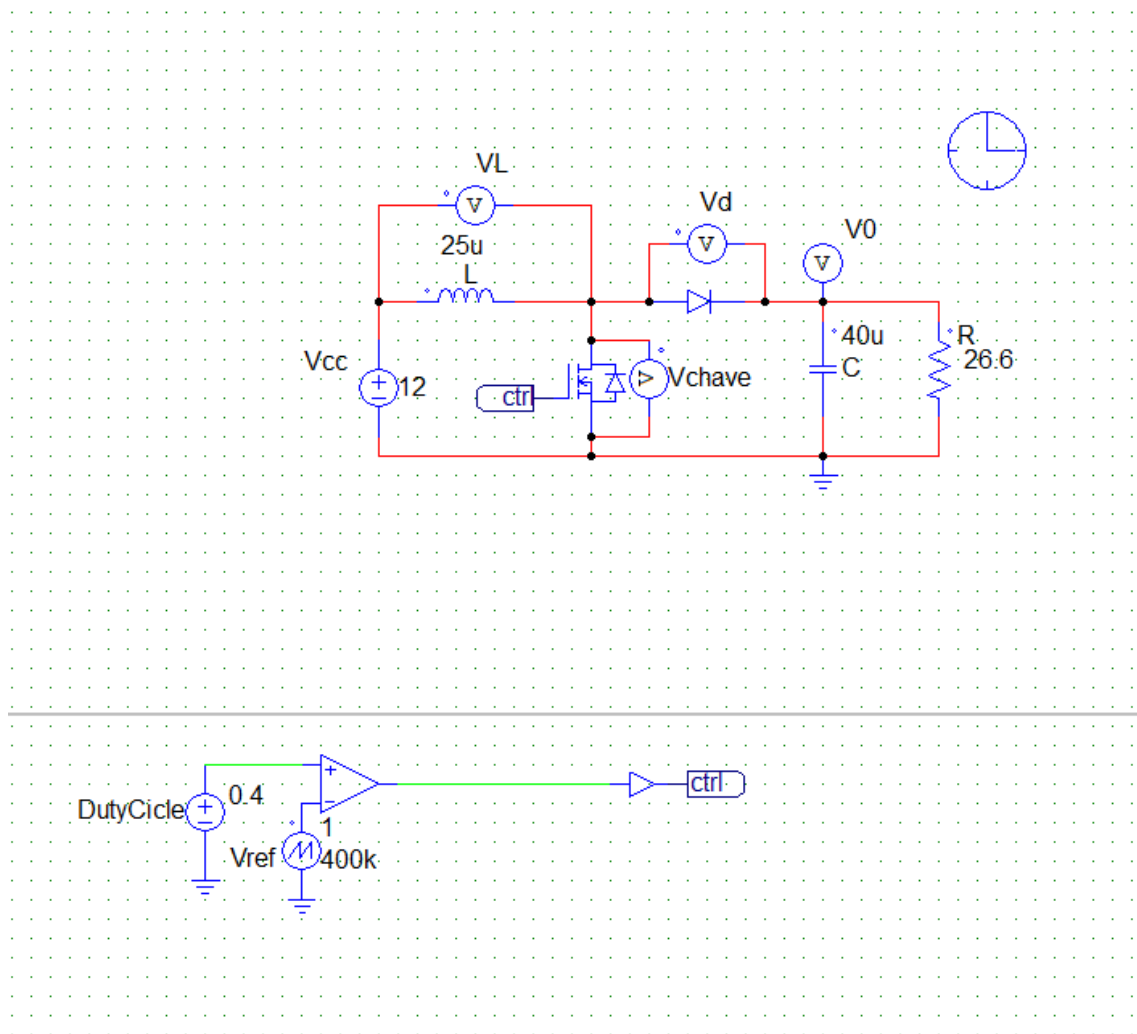


Figura 40: Corrente Média  $I_o$ .

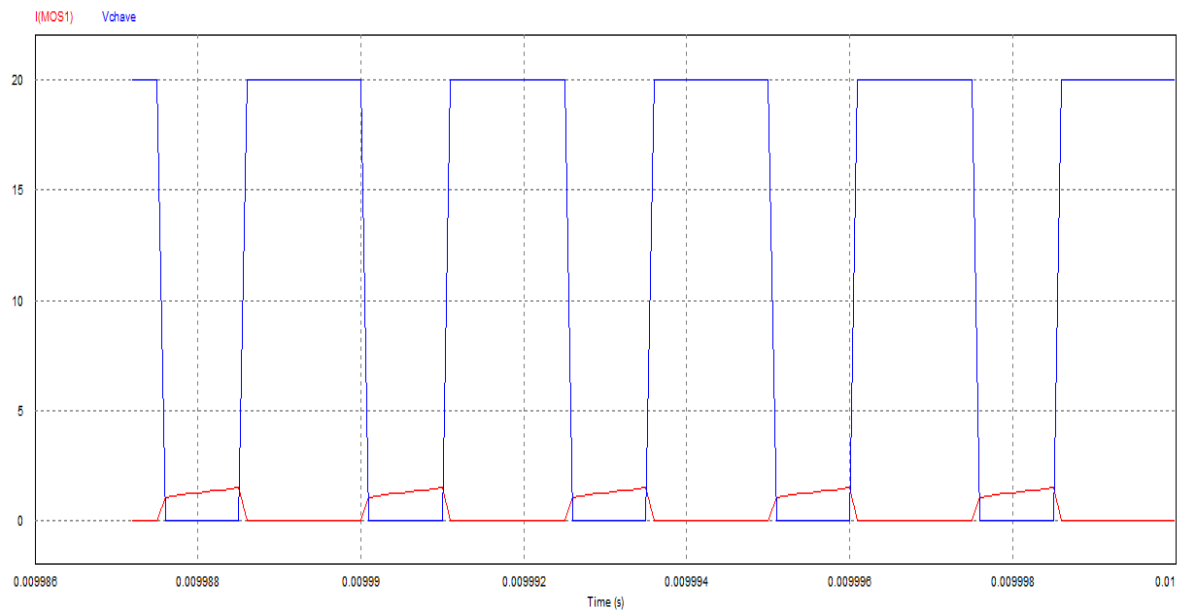
A partir dos gráficos apresentados, percebe-se que a corrente do indutor não está calculada corretamente, pois não foi levado em consideração a tensão de entrada e sim a tensão de saída resultando em 1,49 A como pico e não 2,08A como deveria ser.

**Letra b)**

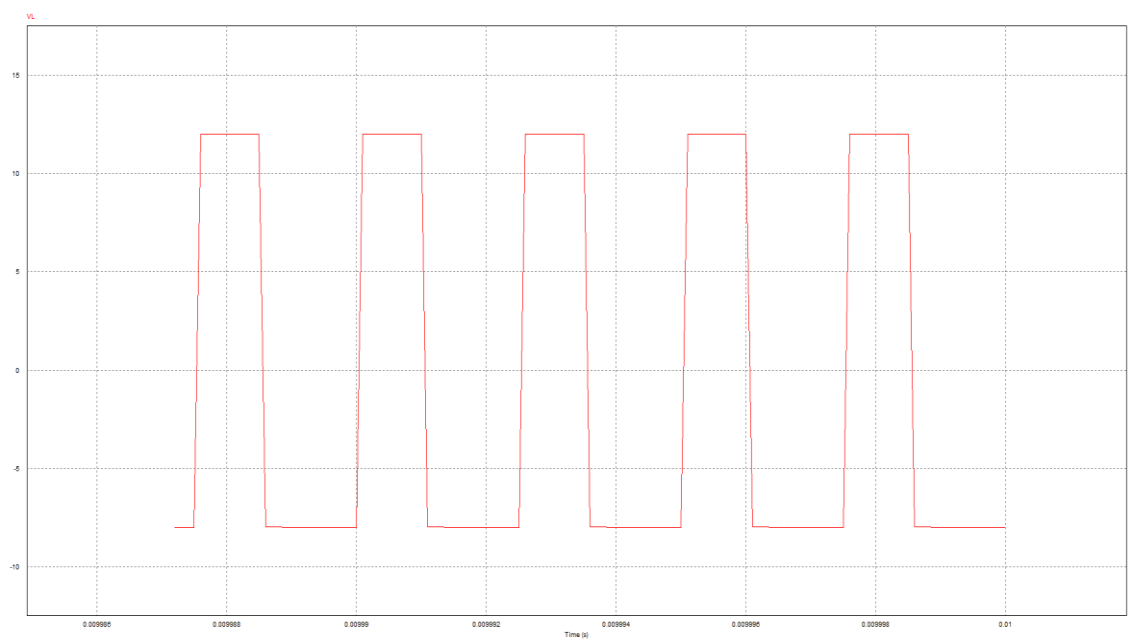
Com a Potência de saída com o valor de 15 W é calculado o novo valor do resistor, sendo obtido  $R = 26,6 \, \Omega$ .



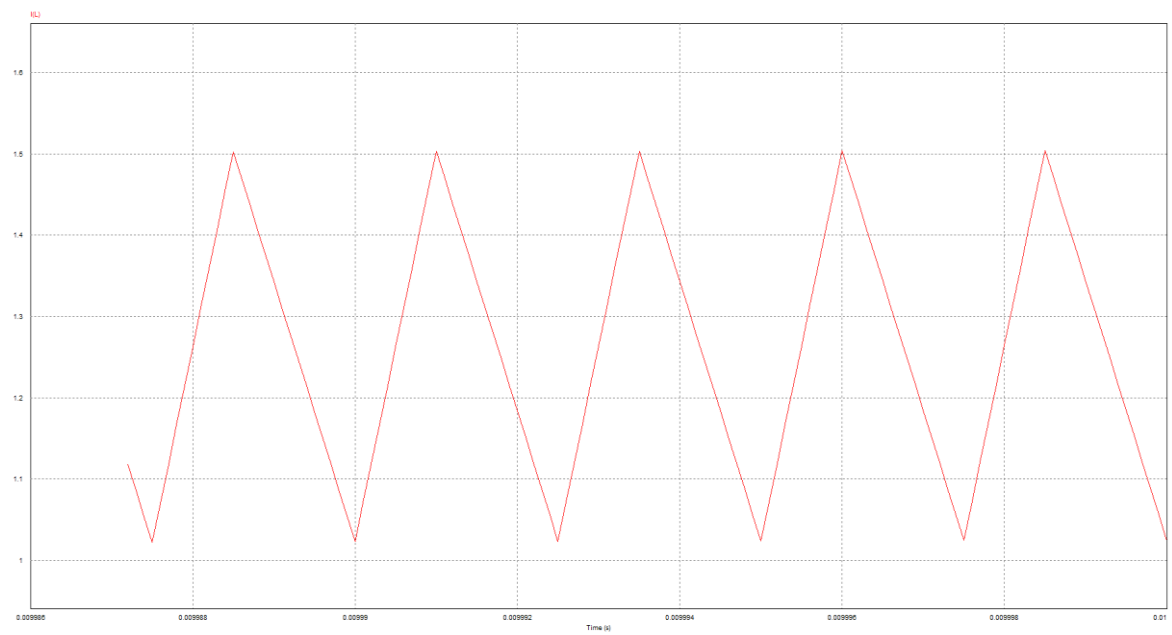
**Figura 41: Circuito com a novo valor do resistor.**



**Figura 42: Tensão e Corrente na Chave ,12V D=0.4.**



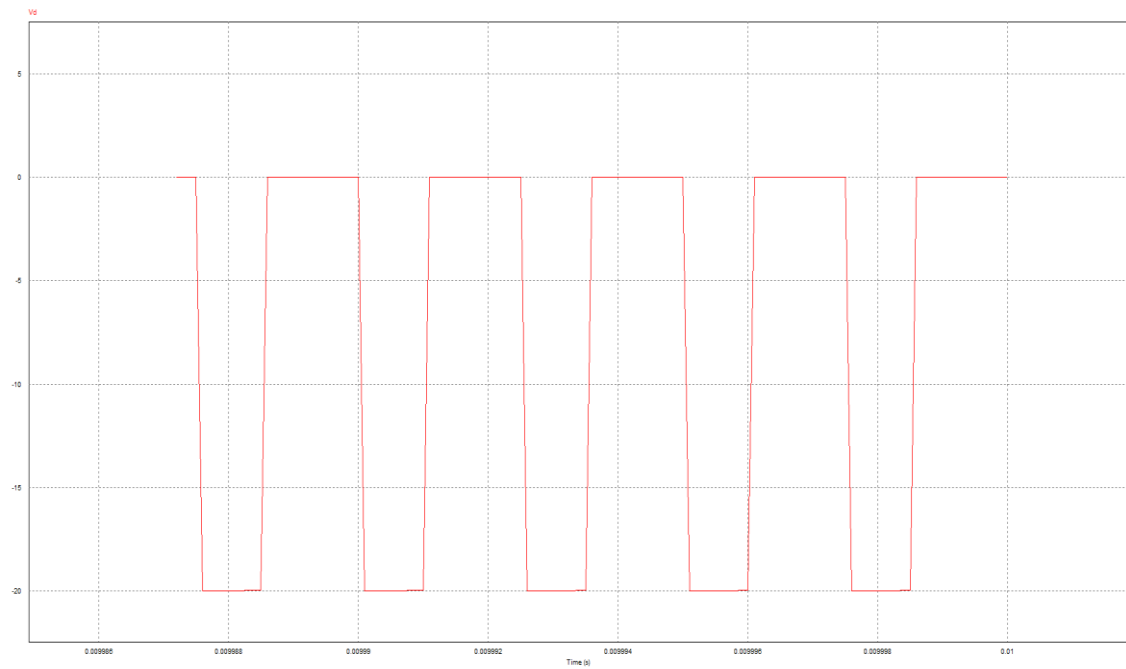
**Figura 43: Tensão  $V_L$ .**



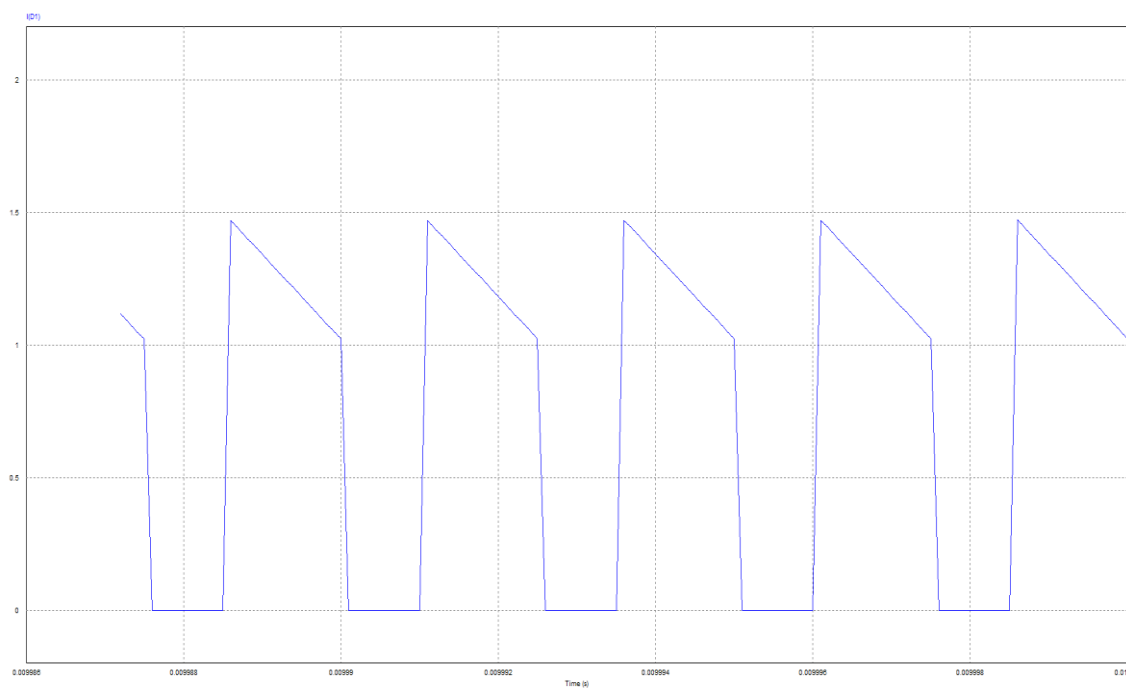
**Figura 44: Corrente do indutor.**

Average Value			x
Time	From	9.9872000e-003	
Time	To	0.0000000e+000	
$I(L)$		1.2576418e+000	

**Figura 45: Valor médio da corrente no Indutor.**



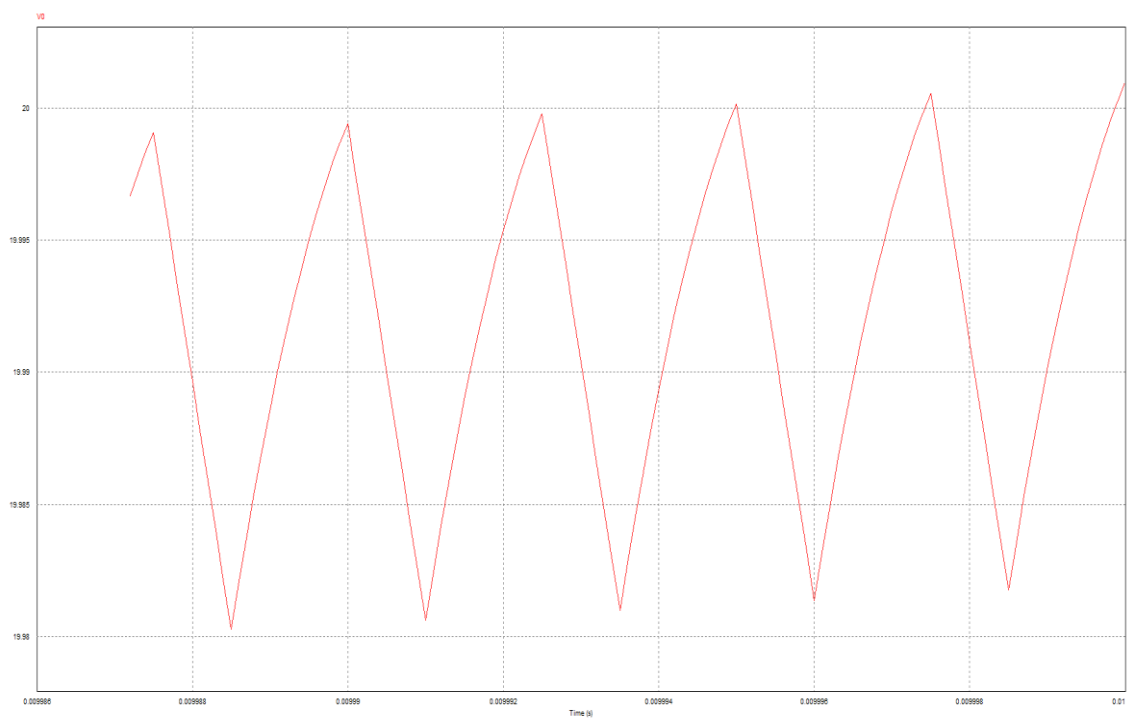
**Figura 46: Tensão  $V_d$ .**



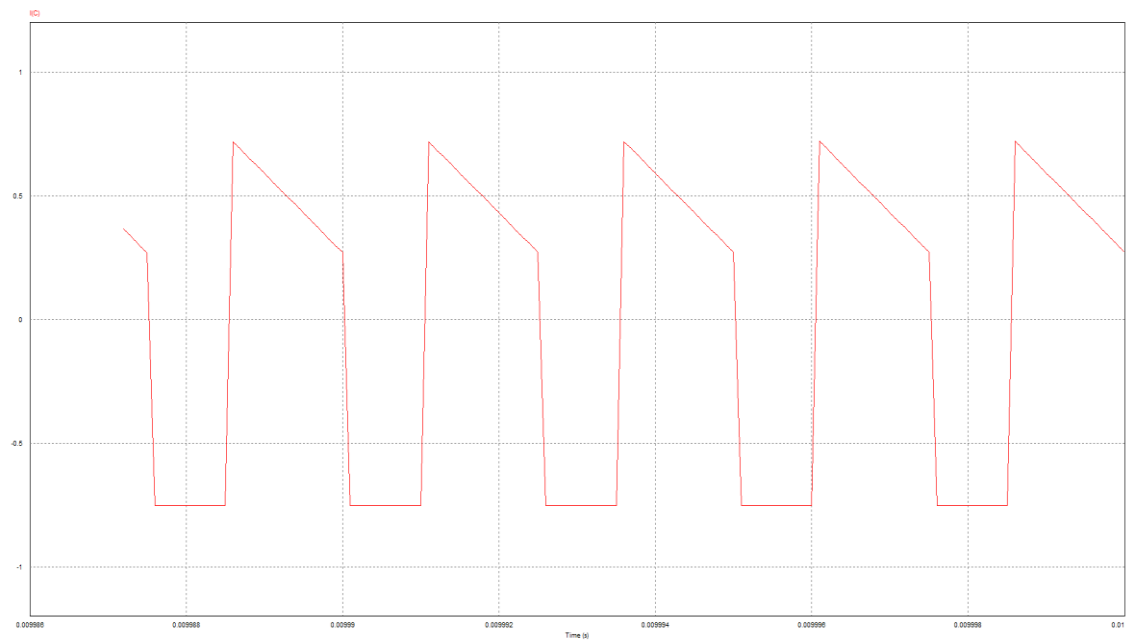
**Figura 47: Corrente no diodo.**

Average Value		x
Time	From	9.9872000e-003
Time	To	0.0000000e+000
I(D1)		7.5863851e-001

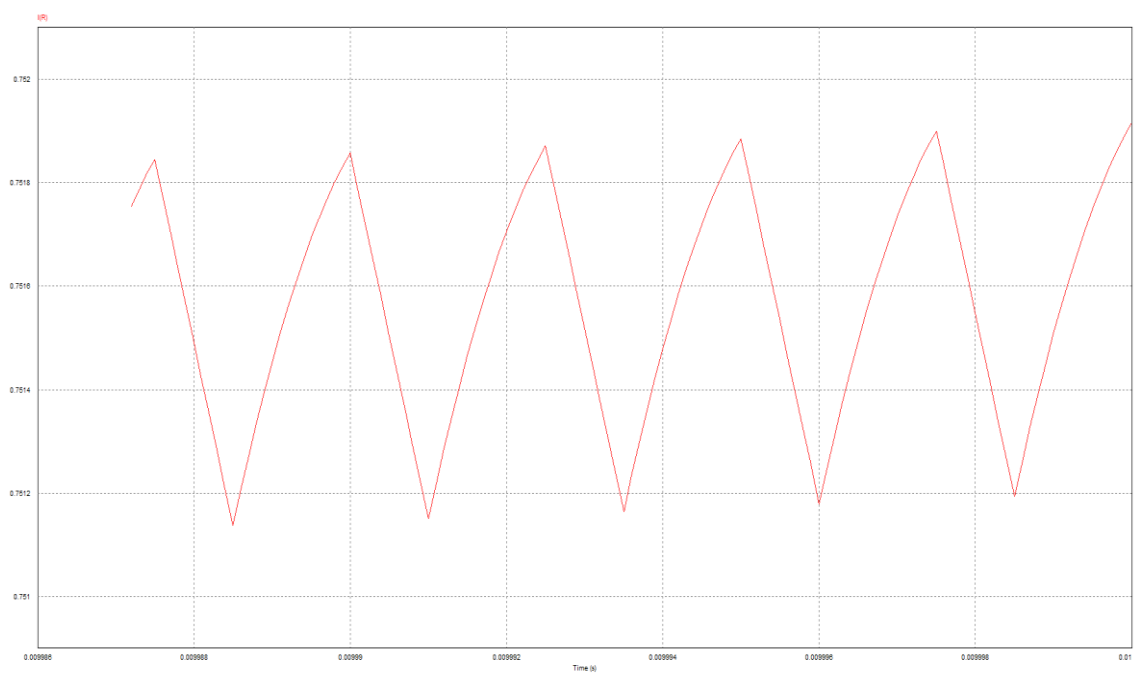
**Figura 48: Valor médio da corrente no diodo.**



**Figura 49: Tensão de Saída.**



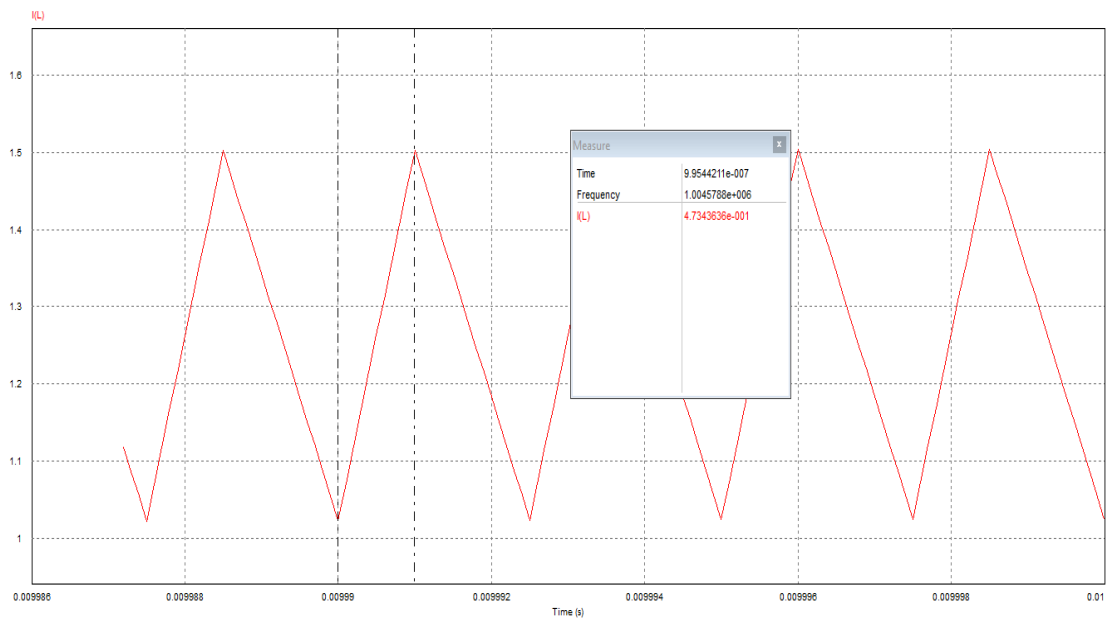
**Figura 50: Corrente no capacitor.**



**Figura 51: Corrente no resistor.**

Average Value			
Time	From		9.9872000e-003
Time	To		0.0000000e+000
I(R)			7.5156388e-001

**Figura 52: Valor médio da corrente no resistor.**



**Figura 53: delta IL.**

Percebe-se que as formas de onda de tensão não alteraram, assim na letra b do teste não foi feito essas ondas, visto que já estavam contidas na letra a.



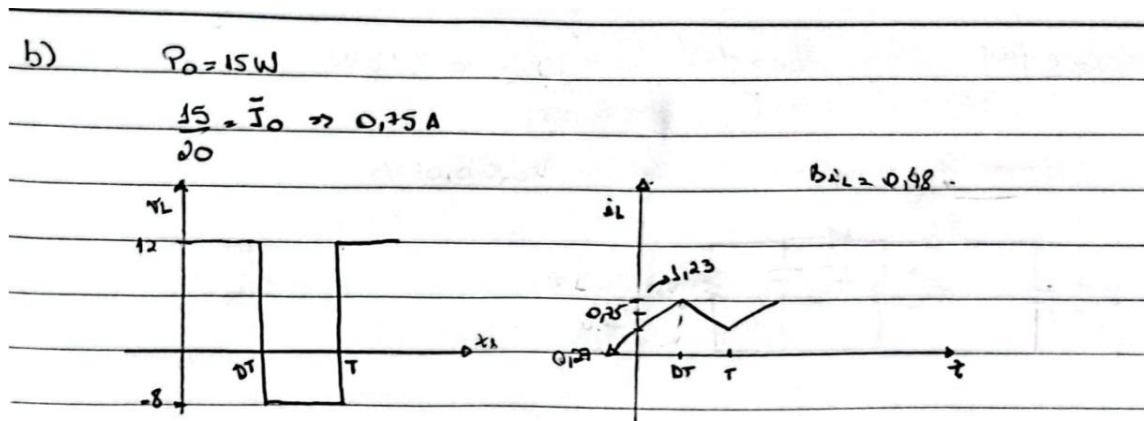


Figura 54: Letra b do teste.

Ao analisar a resposta simulada com o gráfico traçado é visto que foi propagado o erro de calcular a corrente do indutor a partir da corrente média do resistor, visto que deveria ser levado em consideração a tensão de entrada e assim calculado a corrente do indutor.

$$\bar{I}_L = \frac{15}{12} = 1,25 \text{ A.}$$

Assim seu pico estaria em 1,49 A e seu menor valor em 1,01 A, esses valores representados no gráfico de simulação.

Não foram traçados os gráficos de corrente do diodo e do resistor, pois ambos seriam apenas deslocados do valor médio da corrente do resistor, como mostrado na simulação.

### Letra c)

Nessa questão é necessário obter o valor crítico de potência para estar conduzindo em CCM (Modo de Condução Contínua).

c)  $P_i = P_o$

$$V_i \cdot \bar{I}_i = P_o$$

$$12 \cdot \bar{I}_i = P_o$$

$$P_o = 288 \text{ W}$$

$$\Delta I_{L_{\text{min}}} = \bar{I}_i - \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$\bar{I}_i = 0,24 \text{ A}$$

Figura 55: Resolução da letra c do teste 2.

Como vamos simular, é preciso calcular a resistência, a qual chegamos 138,88  $\Omega$ .

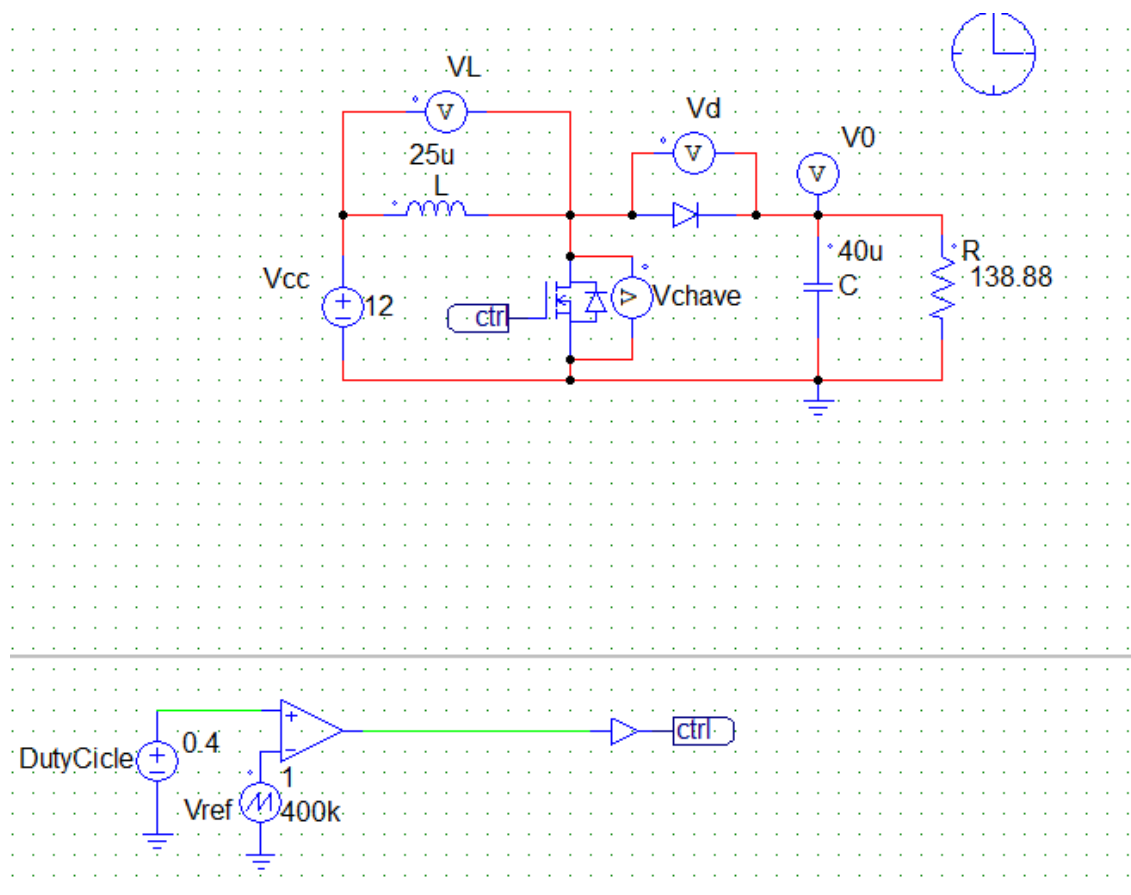


Figura 56: Circuito com a resistência de  $138.88 \Omega$

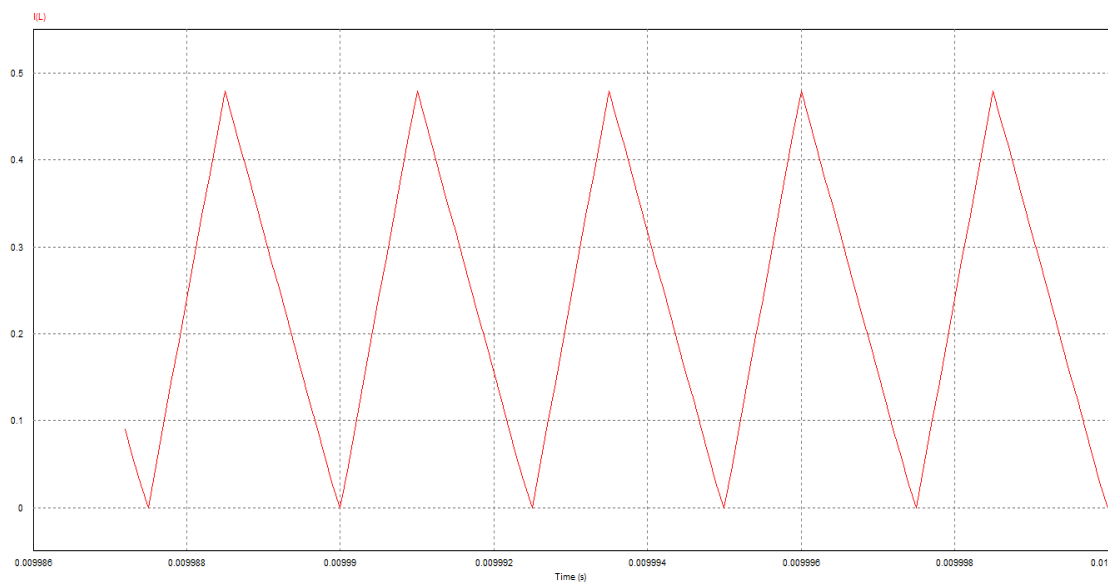


Figura 57: Corrente do indutor no modo condução contínua.

Letra d)

$$\begin{aligned}
 d) \quad i_{L \min} &= \bar{I}_i - \frac{\Delta i_L}{2} & L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} &= \Delta i_L & P_o &= 5W \\
 i_{L \min} &= \bar{I}_i - \frac{E D T_o}{2L} & i_{L \min} &= 0 & \frac{E D T_o}{L} &= \Delta i_L & 12 \cdot \bar{I}_i &= 5 \\
 & & & & & & \bar{I}_i &= \frac{5}{12} A \\
 \frac{E D T_o}{2L} &= \bar{I}_i \\
 \frac{E D T_o}{2 \bar{I}_i} &= L_{\min} \Rightarrow L_{\min} = \frac{12 \cdot 0,6 \cdot 12}{400 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 5} \Rightarrow 21,6 \mu H
 \end{aligned}$$

Figura 58: Resolução da letra d.

Analisando a imagem de resolução acima percebe-se que foi confundido o Duty cycle de 0,4 com 0,6 assim o certo da indutância mínima seria de 14,4uH e como é necessário um resistor para simular com a Potência de saída com 5 W teríamos uma corrente de saída de 0,25 A e um resistor de 80 Ω.

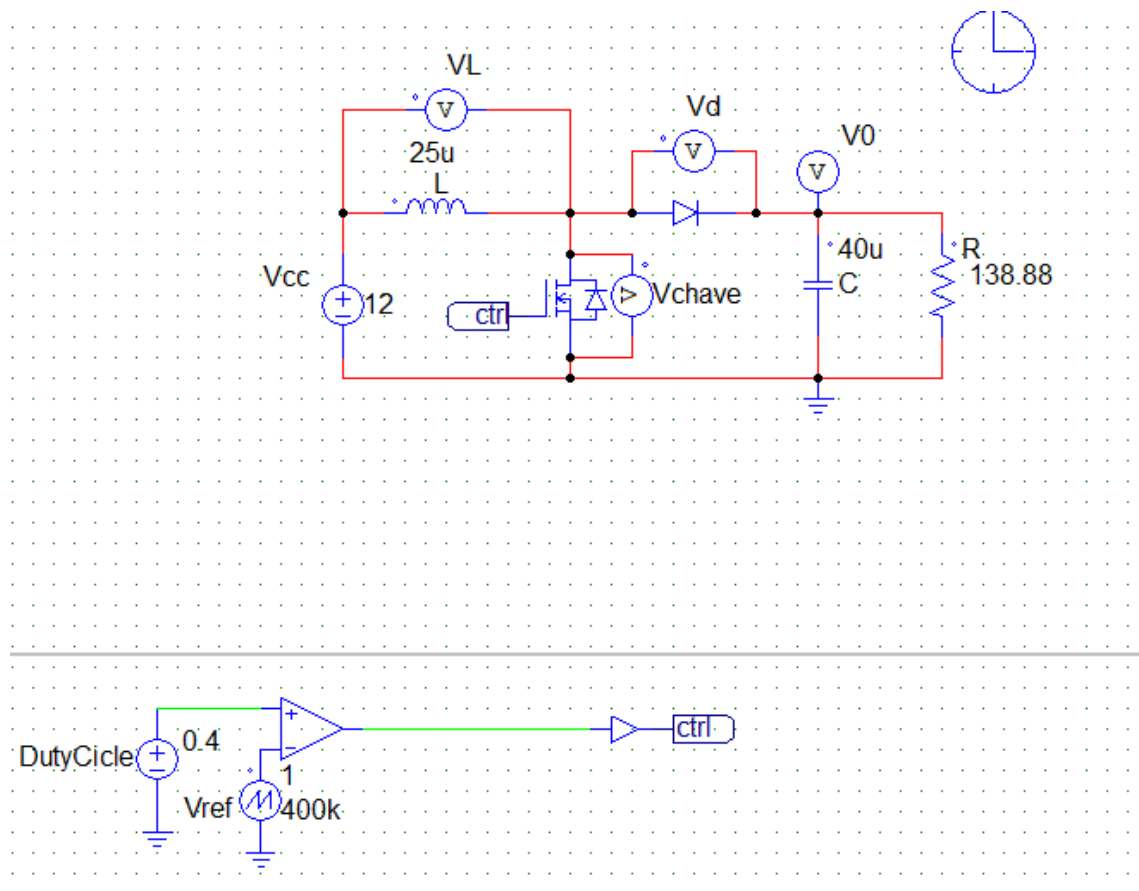
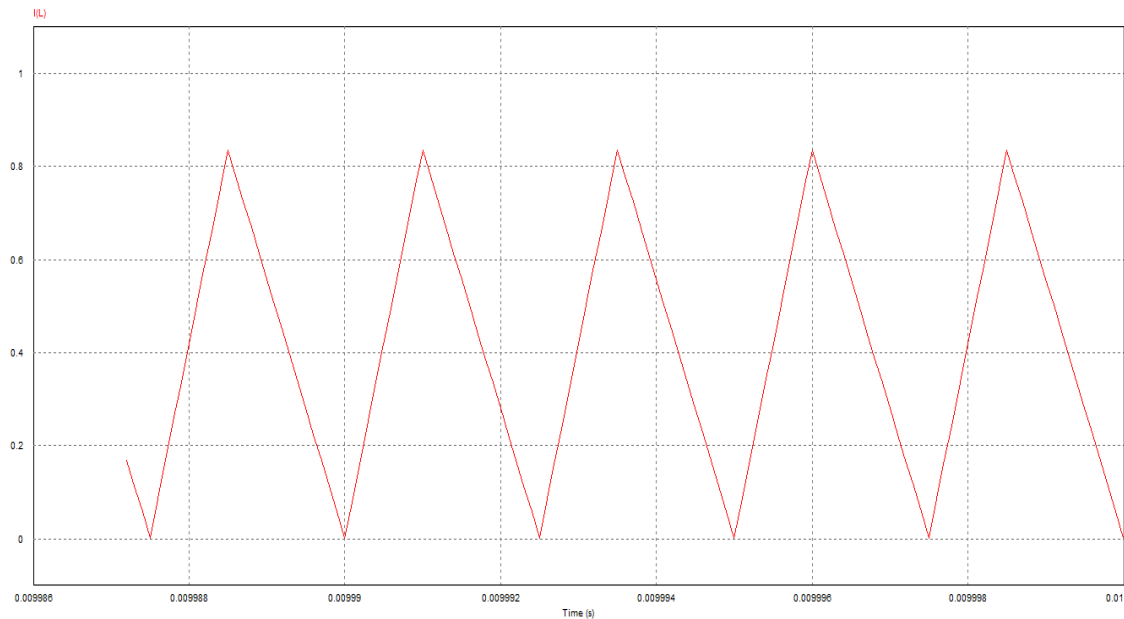


Figura 59: Circuito utilizado na simulação.



**Figura 60: Forma de onda na corrente do indutor em CCM.**

**Letra e)**

2)  $g_s < V_{in} \leq 15$   $P_o = 40W$

$9 \cdot \bar{I}_i = 40$   $15 \cdot \bar{I}_i = 40$   $V_o \cdot \bar{I}_o = 40W$

$\bar{I}_i = 40/9$   $\bar{I}_i = \frac{40}{15}$   $2p \cdot \bar{I}_o = 40W$

$\bar{I}_o = 2A$

$L_{min} = \frac{E D T_o}{2 \bar{I}_i}$   $\frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_i} = (1-D)$

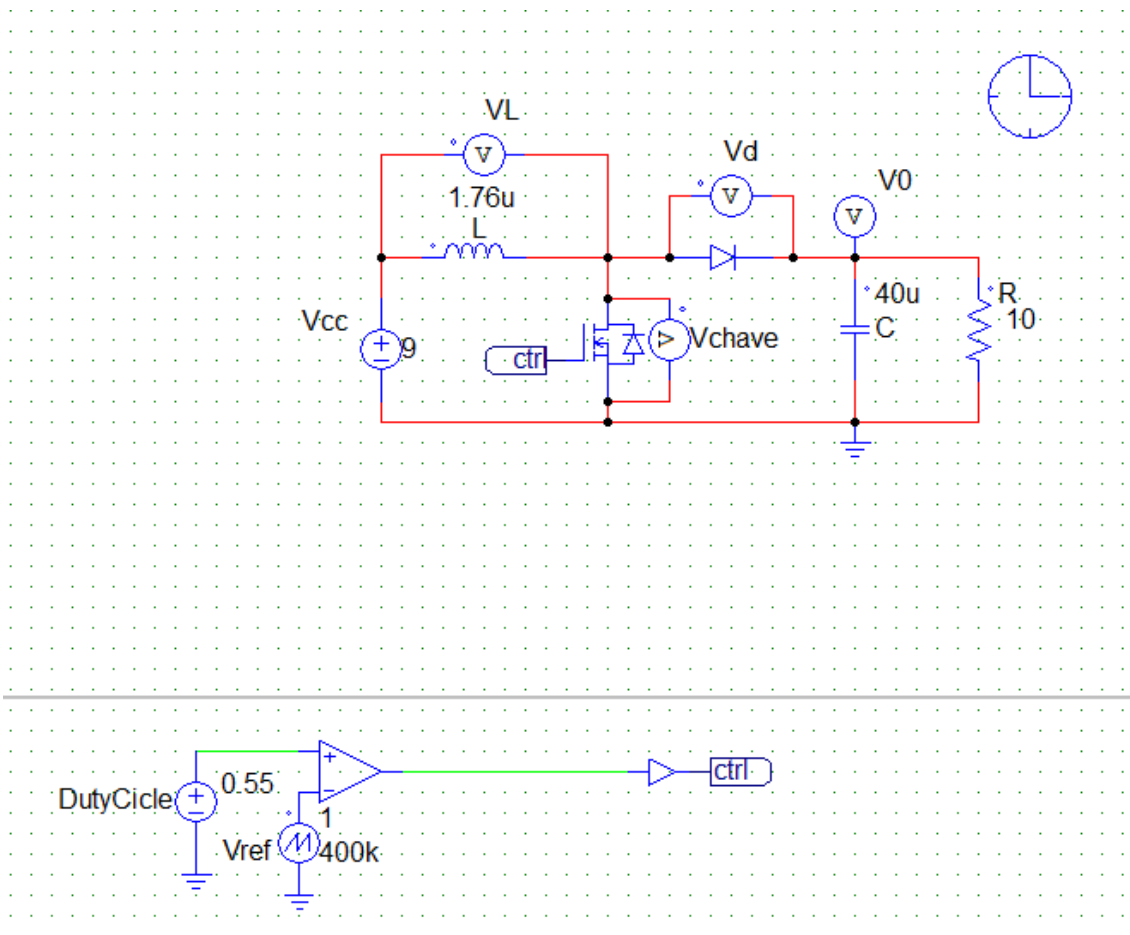
$L_{min_1} = \frac{9 \cdot 0.55 \cdot 1}{2 \cdot \frac{40}{9} \cdot 400 \cdot 10^3} = 1.4 \mu H$   $\frac{2}{40/9} = (1-D) \Rightarrow 0.45 = 1-D$   $\frac{2}{40/9} D = 0.55$   $D = 0.25$

$L_{min_2} = 1.76 \mu H$   $1.4 \mu H \leq L_{min} \leq 1.76 \mu H \rightarrow$  valeur 0 major.

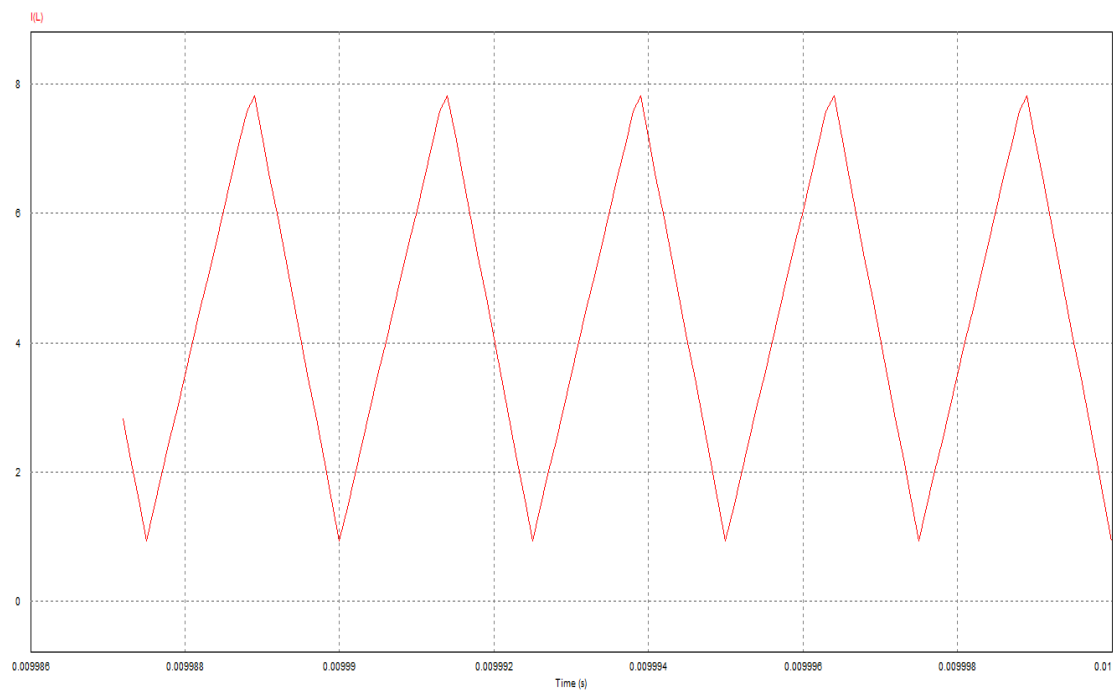
tilibra

**Figura 61: Resolução da letra e do teste 2.**

A partir da resolução acima percebe-se que o valor de indutância mínima a ser escolhida é de 1,76uH, assim para simulação utilizaremos um resistor de 10  $\Omega$ , e será representado os circuitos e a forma de onda do indutor em CCM para os valores 9V e 15V de entrada.



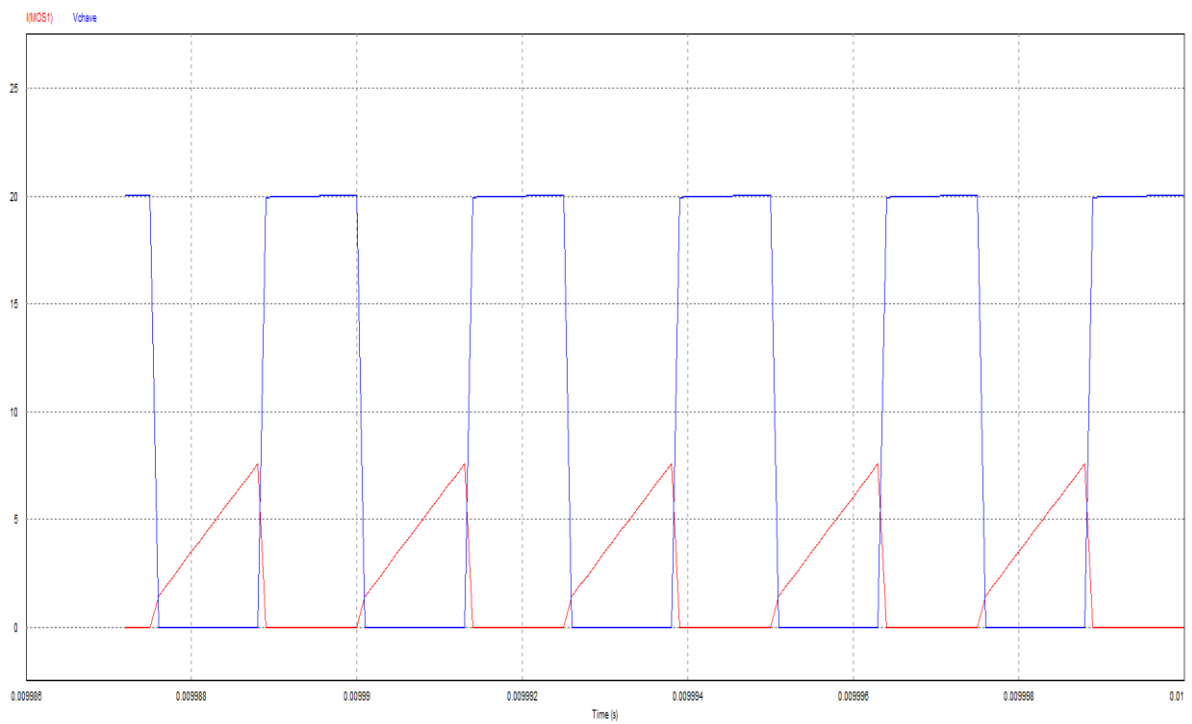
**Figura 62: Circuito Simulado 9V.**



**Figura 63: Forma de onda indutor em CCM 9V.**

Real Power			
Time	From		9.9872000e-003
Time	To		0.0000000e+000
I(R) vs. V0			3.9966632e+001

**Figura 64: Potência em 9V.**



**Figura 65: Gráfico de Tensão e Corrente na chave 9V, D=0.55.**

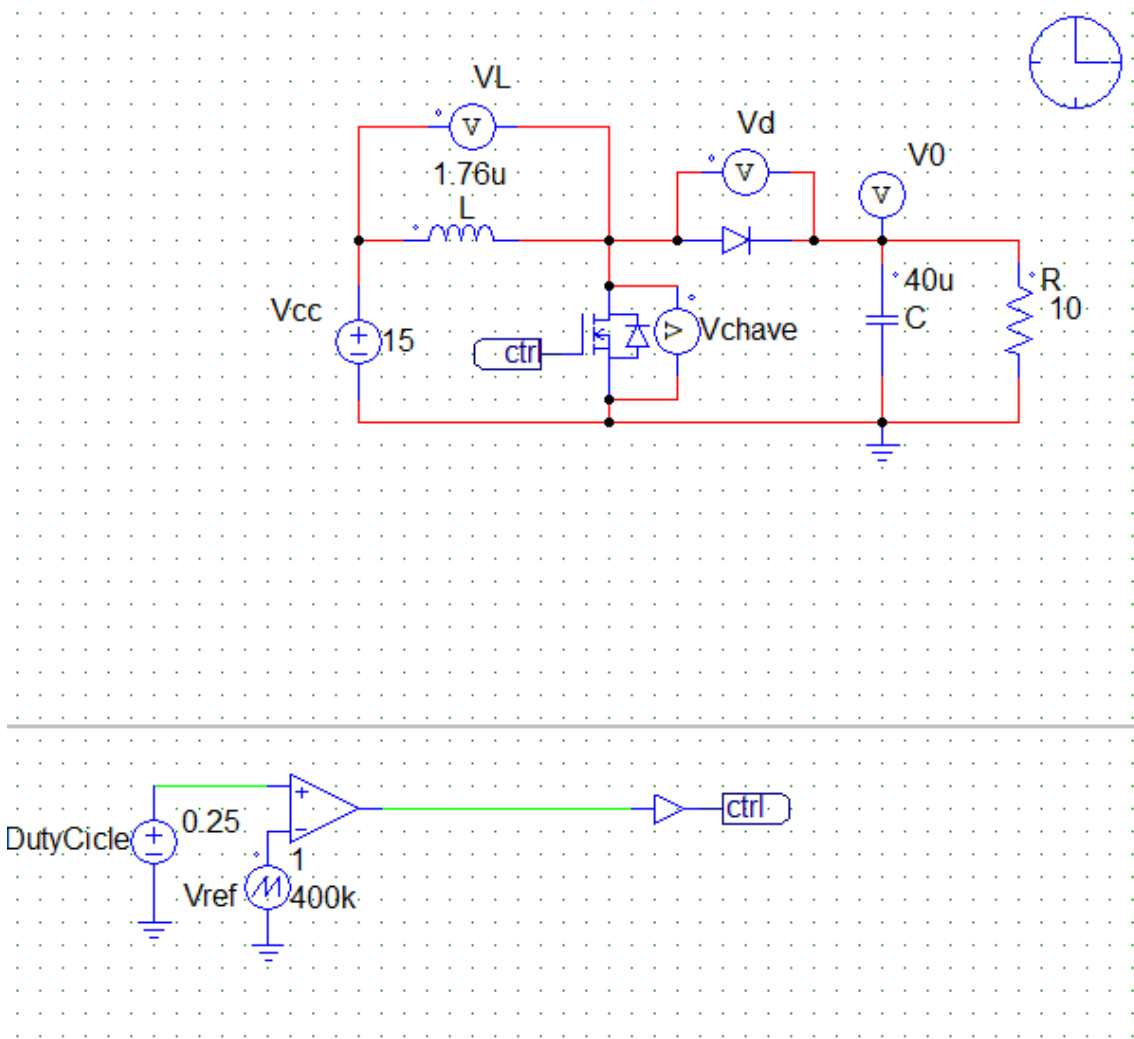


Figura 66: Circuito simulado 15V.

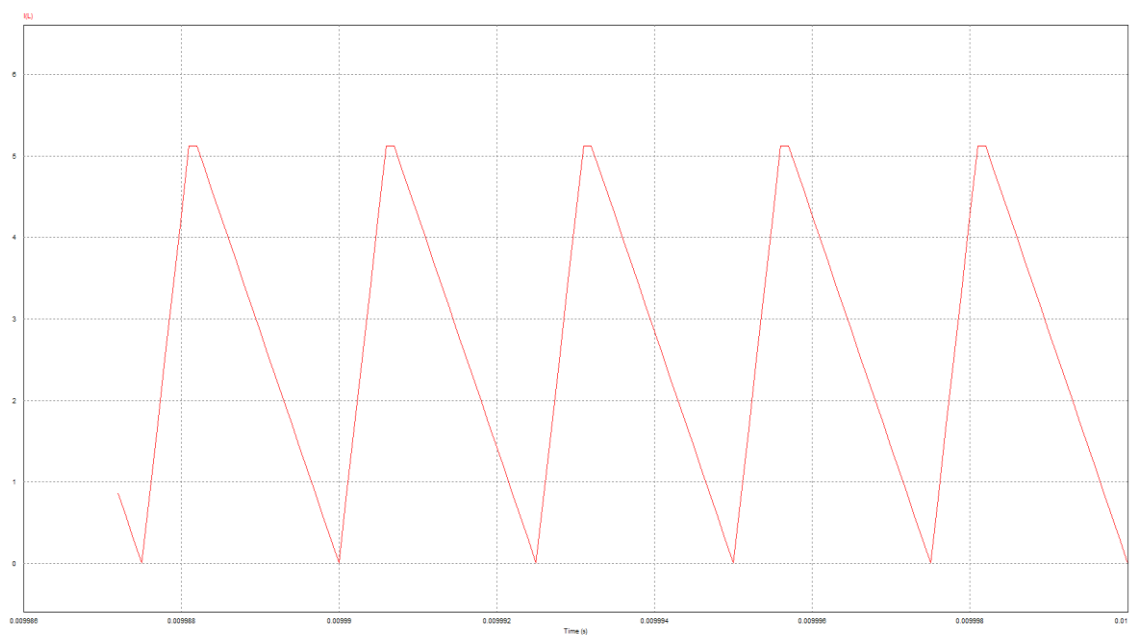
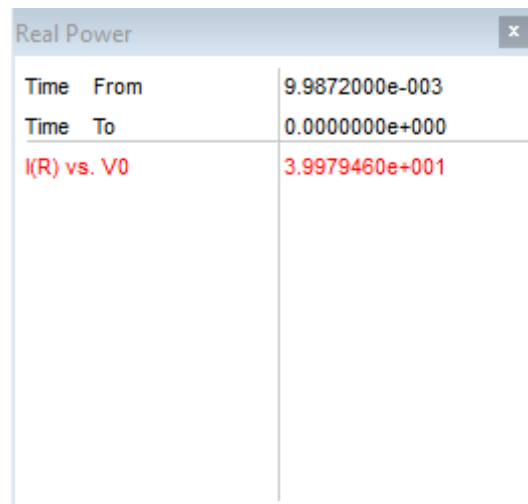
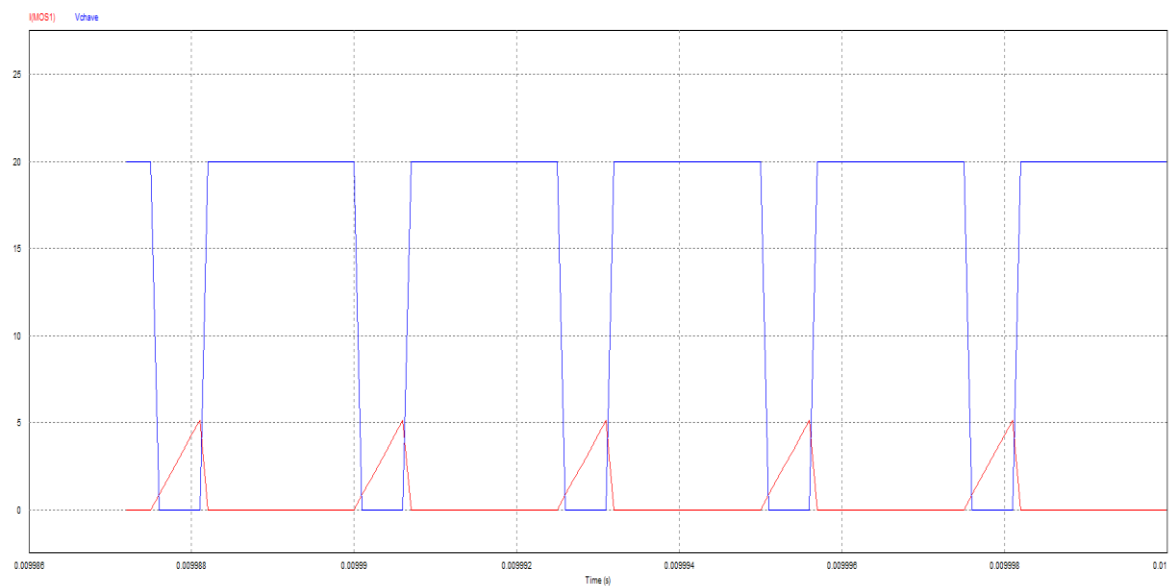


Figura 67: Forma de onda do indutor em CCM 15V.



**Figura 68: Potência em 15V.**



**Figura 69: Tensão e Corrente na Chave 15V D=0.25.**



## 4. TESTE 3:

### 4.1. QUESTÃO 4:

#### Questão 4

Projete um inversor que tenha uma saída PWM e alimente uma carga  $RL$  série, sendo  $R = 10\ \Omega$  e  $L = 20\text{ mH}$ . A componente fundamental da tensão na saída deve ser de  $120\text{ V rms}$  e  $60\text{ Hz}$  e a distorção harmônica total da corrente na carga deve ser menor que 8%. Especifique a tensão CC de entrada, a taxa de modulação da amplitude  $m_a$  e a frequência de chaveamento.

Figura 70: Dados e parâmetros da questão.

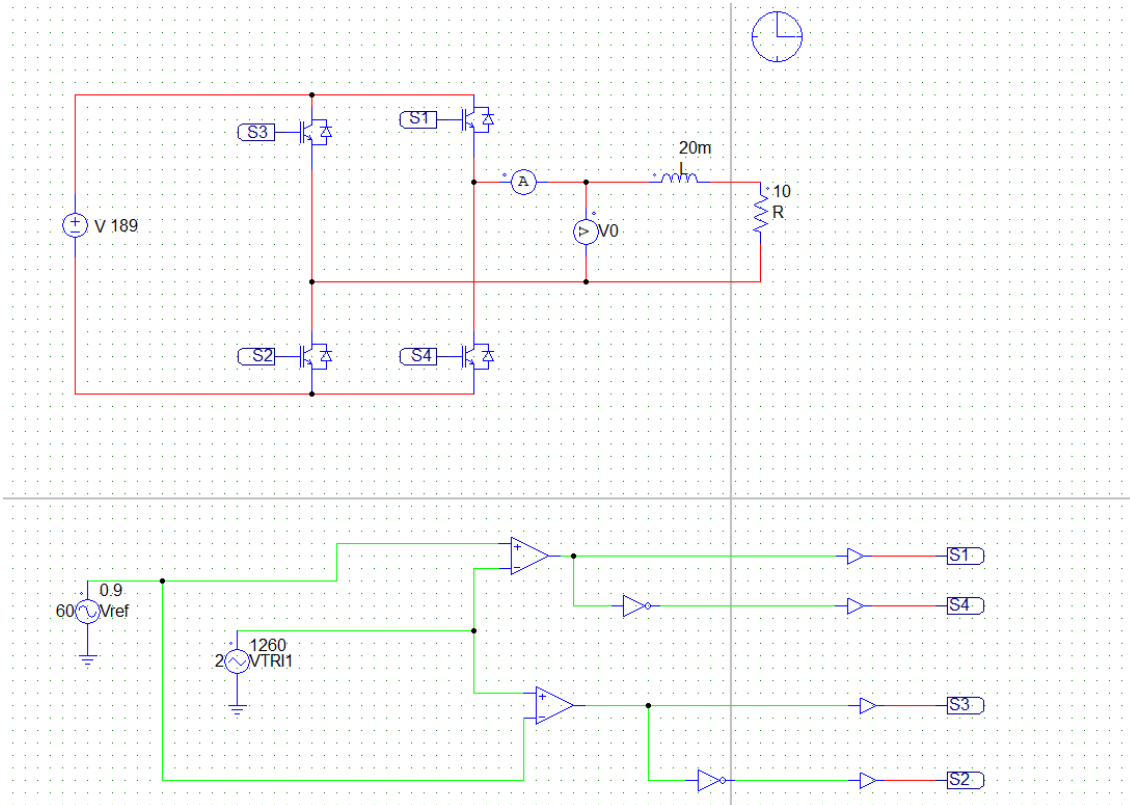


Figura 71: Circuito e controle de chaveamento.

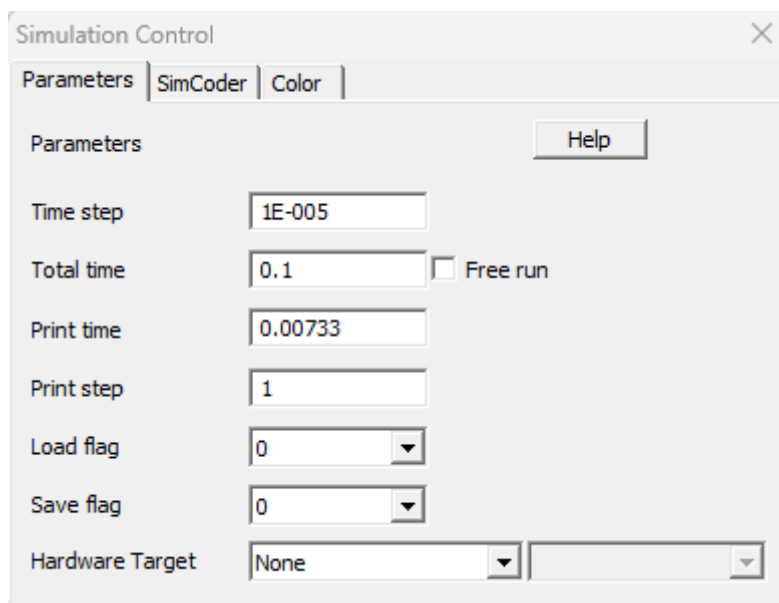


Figura 72: Parâmetros do controle de simulação utilizados.

4)  $R=10\Omega$   $L=20mH$   $V_{s,rms}=120V_{rms}$   $f=60Hz$   
 $THDi < 8\%$   $V_{cc}=?$   $m_a=?$   $f_s=?$   
 $m_a = \frac{60}{f_s}$   $V_1 = 120\sqrt{2} \Rightarrow 169,70V$   
 $I_1 = 13,55A$   
 aproximando  $m_a = 0,9$   
 $I_{mf} < 0,08I_1$   $Z_{mf} > \frac{V_{mf}}{I_{mf}} = \frac{134}{1,09} = 123\Omega \approx m_f \omega L$   
 $V_{cc} = 189V$   $I_{mf} < 1,09A$   
 $m_f > 16,4$

Figura 73: Resolução da questão 4 do teste 3.

Na resolução acima foi omitido alguns passos, como o cálculo da corrente de pico que seria calculado a partir do valor de tensão RMS sobre o módulo da impedância multiplicado pela raiz de 2 garantindo a corrente acima, também foi omitido como encontrou-se o  $V_{cc}$ , sendo a aplicação do  $\frac{169}{0,9} = 189V$

aproximadamente. Com isso foi obtido a corrente  $I_{mf}$  sendo a multiplicação do  $THDi$  pelo pico da corrente fundamental e a tensão  $V_{mf}$  para encontrar o valor necessário de  $m_f$ . A partir da impedância  $Z_{mf}$ , nota-se que  $m_f$  deve ser maior do que 16,4 o qual deve possuir apenas valores inteiros ímpares, com isso na simulação foi escolhido o  $m_f = 21$ , pois ao calcular o  $Z_{mf}$  estamos considerando apenas uma componente a  $m_f$ , assim desconsiderando as outras e propagando erros, ao considerar um  $m_f$  maior podemos chegar no  $THDi < 8\%$ . Um resultado semelhante seria possível ao considerar 0,8, como apresentado nos slides das aulas, o qual chegaríamos em um  $m_f > 21$  no caso seria escolhido o 23.

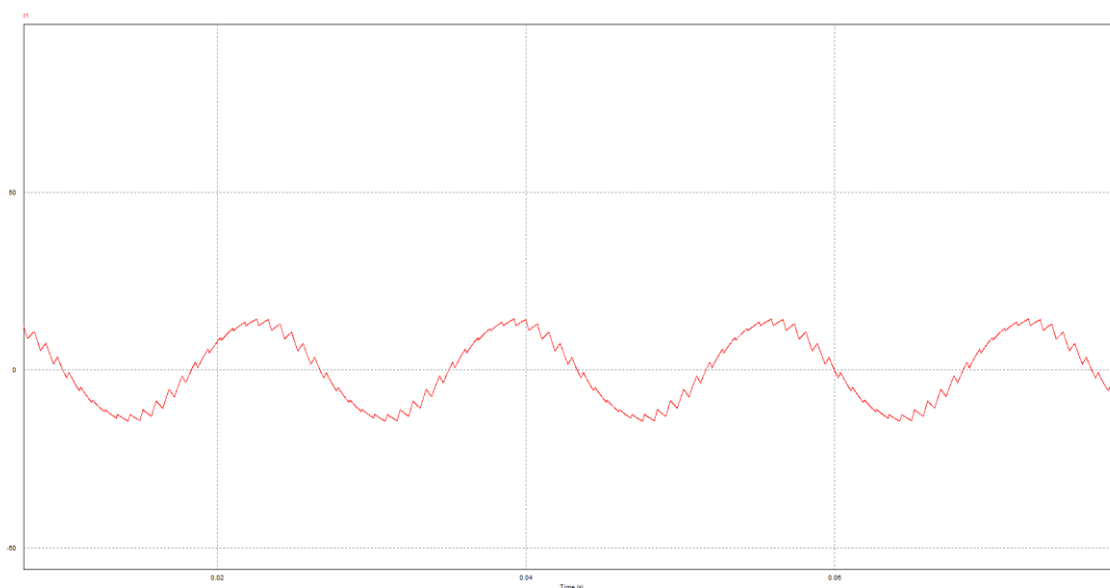


Figura 74: Forma de onda da corrente na carga.

THD	
Fundamental Frequency	6.0000000e+001 HZ
I1	7.4525707e-002

**Figura 75: THDi da corrente fundamental.**



**Figura 76: Forma de onda da tensão na carga.**

## 5. TESTE 4:

### 5.1. QUESTÃO 2:

#### Questão 2

Considere o circuito retificador a diodo monofásico ilustrado na Figura 2. O valor eficaz da tensão da rede é  $V_s = 230 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$ . Assuma que a carga é representada por uma fonte cc constante,  $I_d = 10 \text{ A}$ .

- Esboce a tensão CC de saída.
- Encontre uma equação para o valor médio da tensão CC.
- Esboce a corrente da rede  $i_s(t)$  indicando qual diodo está conduzindo em função do tempo.
- Calcule o valor eficaz da corrente da rede  $i_s$ .
- Prove que o valor eficaz da fundamental da corrente da rede é  $I_{s1} = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} I_d$ .
- Prove que o fator de potência para esse retificador é 0,9.
- Calcule a potência ativa no lado CC e no lado CA.
- Por que a potência aparente é maior que a potência ativa mesmo quando a componente fundamental da corrente está em fase com a tensão da rede?

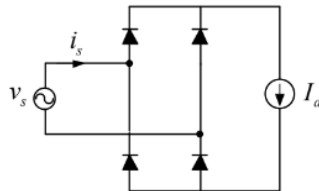


Figura 1: Circuito questão 2.

Figura 77: Dados da questão 2 do teste 4.

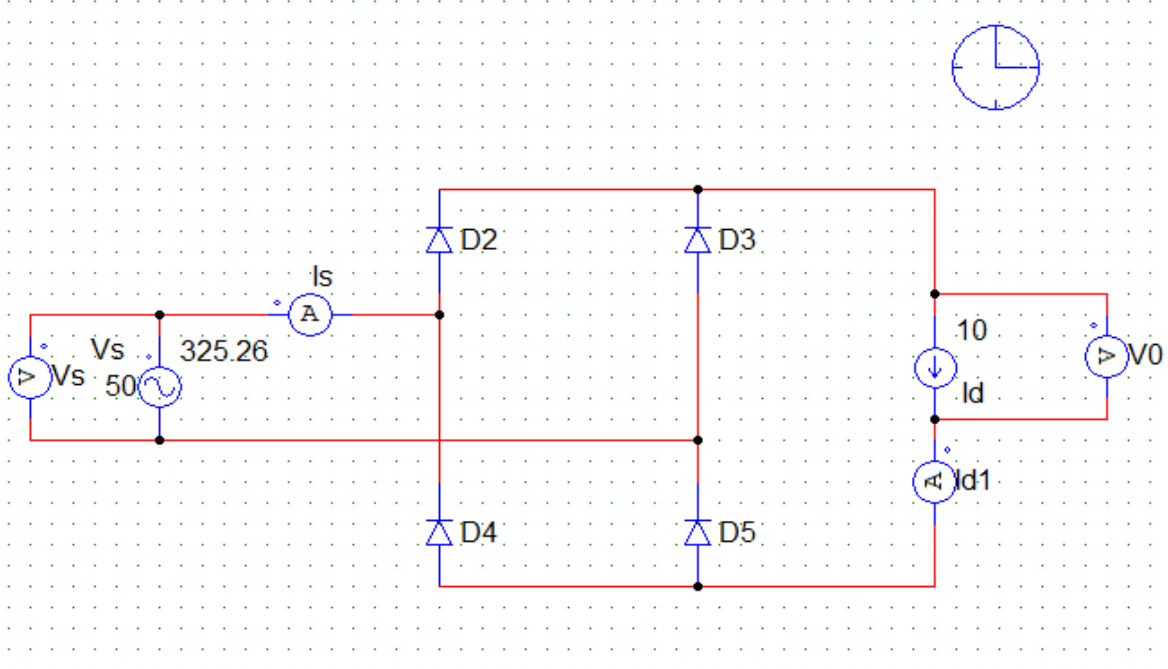


Figura 78: Circuito Simulado.

Simulation Control

Parameters
SimCoder
Color

Parameters
Help

Time step
1E-005

Total time
0.1
☐ Free run

Print time
0

Print step
1

Load flag
0

Save flag
0

Hardware Target
None

Figura 79: Controle de simulação.

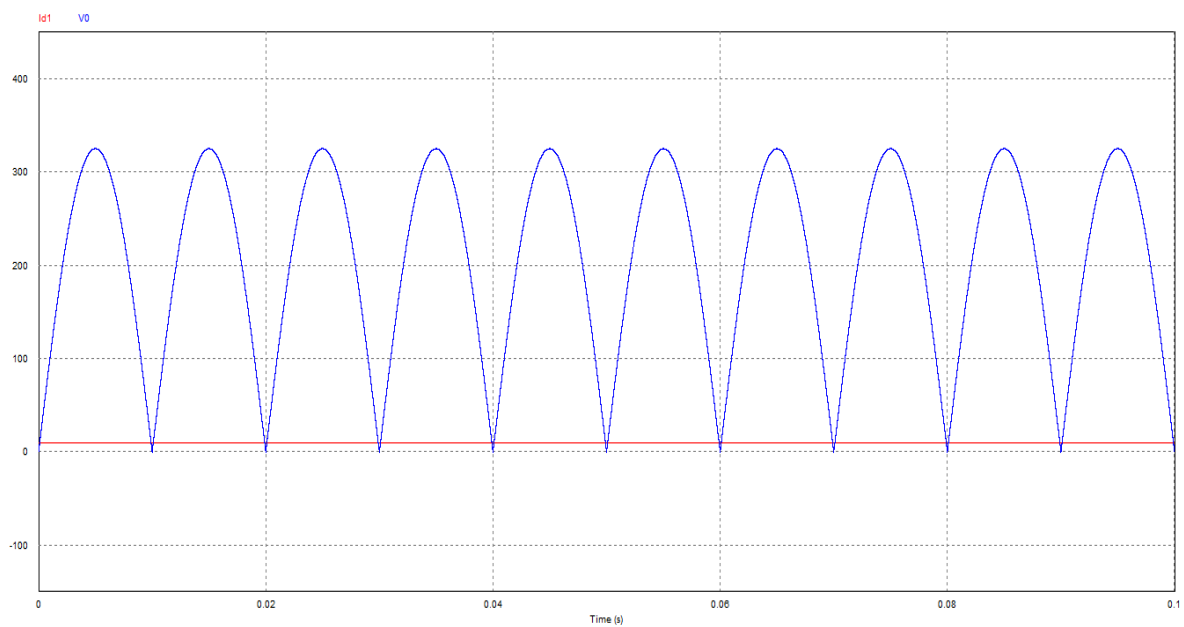
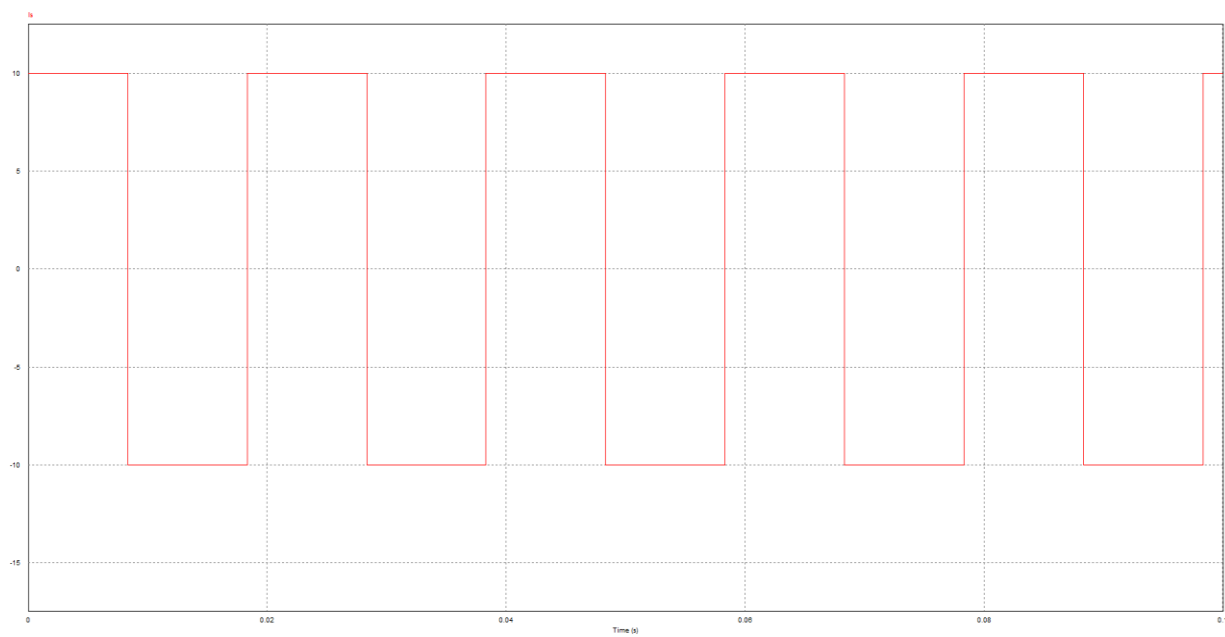


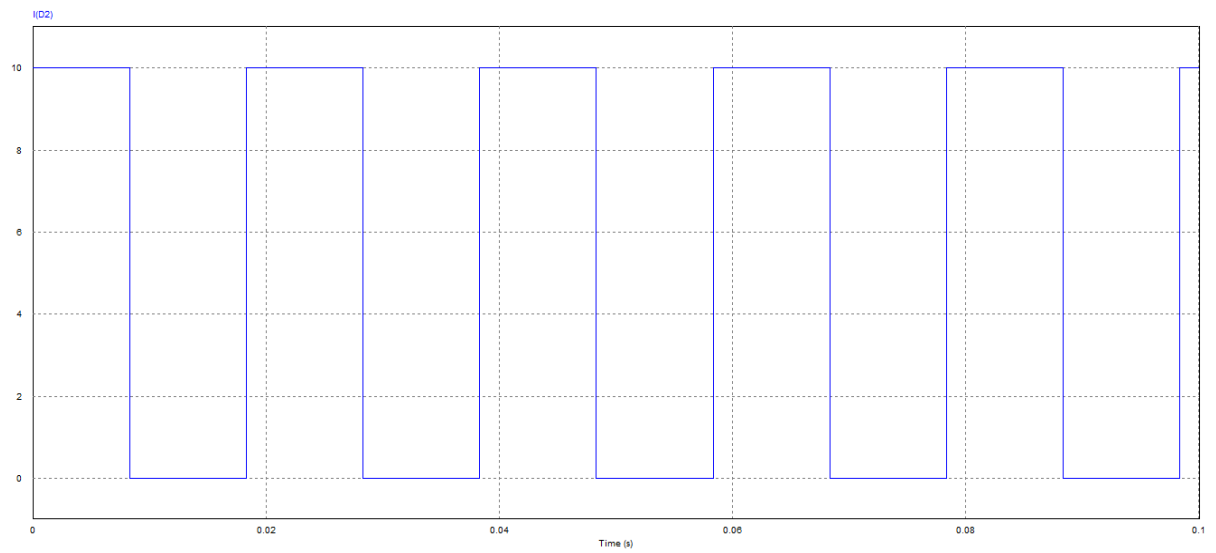
Figura 80: Forma de onda da tensão e corrente da carga.



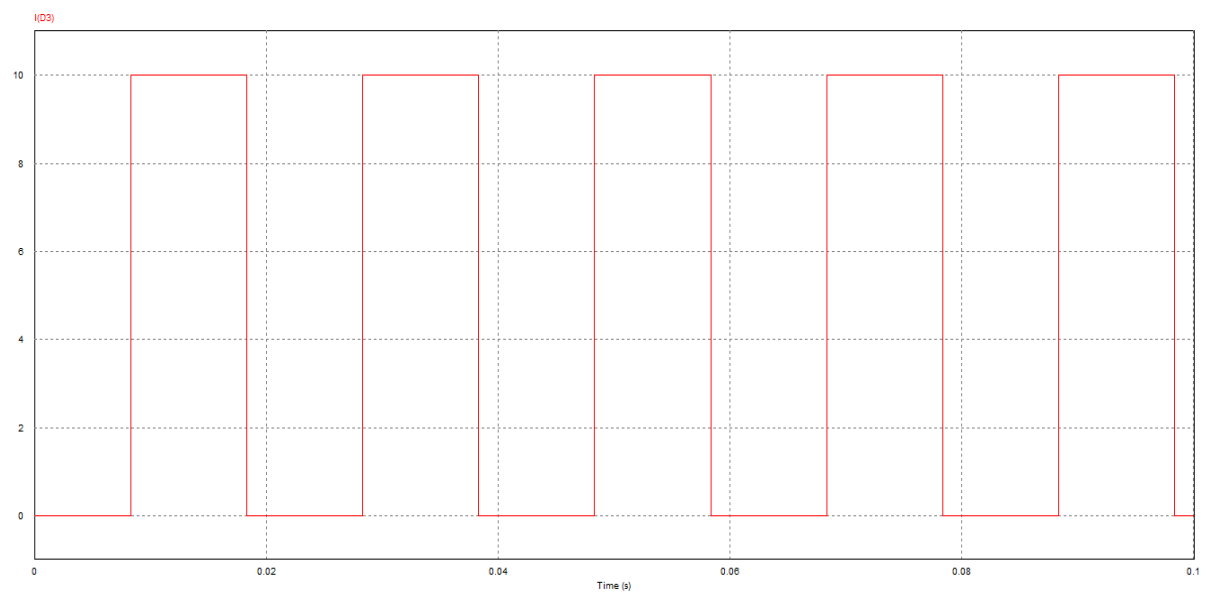
**Figura 81: Forma de onda da corrente Is.**

RMS Value			x
Time	From	1.0000000e-007	
Time	To	1.0000000e-001	
Is		1.0000041e+001	

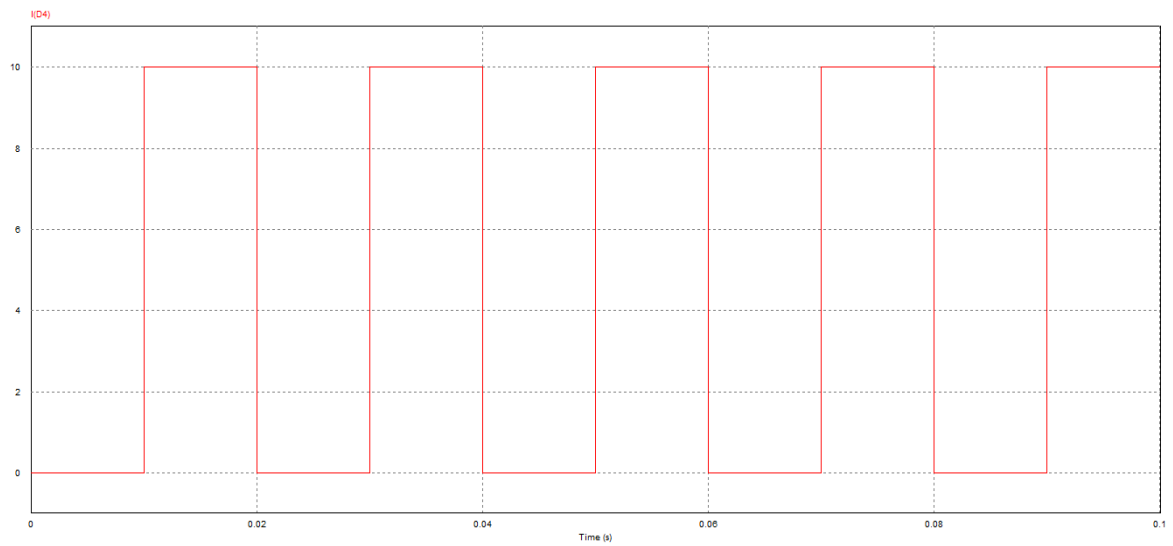
**Figura 82: Valor da corrente Is RMS.**



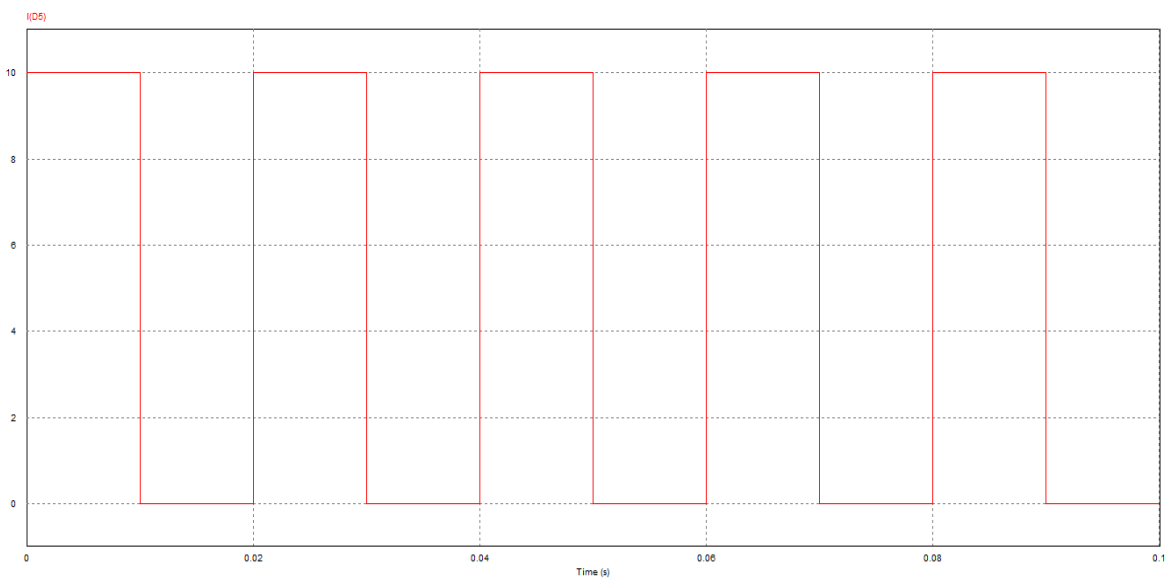
**Figura 83: Forma de onda da corrente do diodo D2.**



**Figura 84: Forma de onda da corrente do diodo D3.**

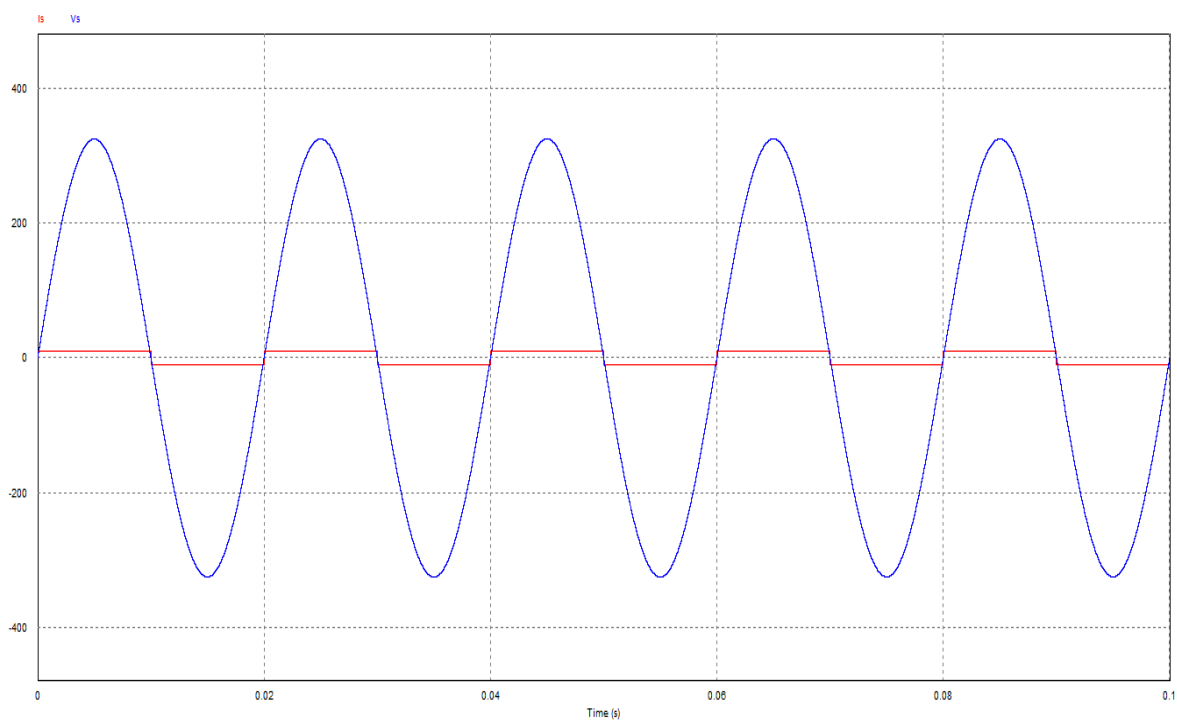


**Figura 85: Forma de onda da corrente do diodo D4.**



**Figura 86: Forma de onda da corrente do diodo D5.**






**Figura 87: Formas de onda da tensão e corrente na fonte**


Ao analisar os gráficos de diodos com o gráfico da corrente na carga percebe-se que o diodo fica alternando entre o D2 e D4 para D3 e D5 em condução.

Power Factor		
Time	From	1.0000000e-007
Time	To	1.0000000e-001
Id1 vs. V0		9.0031613e-001

**Figura 88: Fator de Potência.**

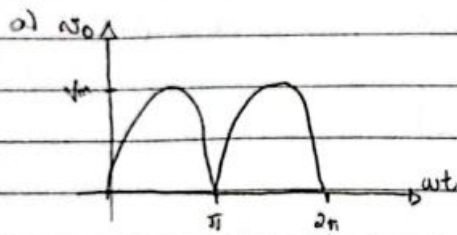
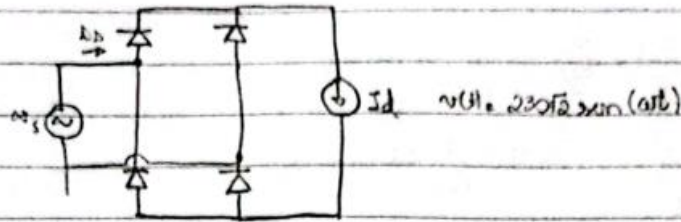
Real Power			
Time	From	7.0000100e-002	
Time	To	1.0000000e-001	
V0 vs. Id1		2.0706673e+003	

**Figura 89: Potência ativa do lado CC.**

Real Power			
Time	From	7.0000100e-002	
Time	To	1.0000000e-001	
Is vs. Vs		2.0706800e+003	

**Figura 90: Potência ativa do lado CA.**

Questão 2:  $V_{rms} = 230V$   $f = 50Hz$  ,  $I_d = 10A$



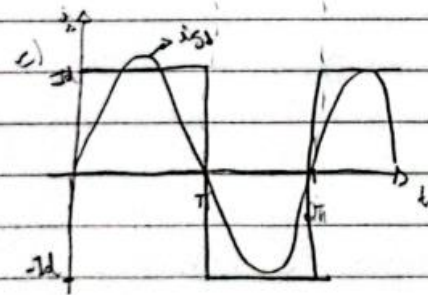
b)

$$\bar{V}_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt$$

$$\bar{V}_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (230\sqrt{2} \sin(50\pi t)) d(\omega t)$$

$$\bar{V}_o = \frac{1}{\pi} 230\sqrt{2} (-\cos(\omega t)) \Big|_0^{\pi}$$

$$\bar{V}_o = 207,07 V$$



d)  $I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2 dt}$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_o^2 dt} \Rightarrow \sqrt{\frac{I_o^2}{\pi}} = I_o = I_d = 10A$$

Figura 91: Resolução da questão 2 do teste 4 parte I

e) Série de Fourier da entrada

$$i_s = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)\}$$

$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i_s \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_o \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{4I_o}{\pi n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{2I_o}{\pi n} (-\cos(n\omega t)) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \Rightarrow b_n = \frac{2I_o}{\pi n} \Rightarrow \frac{4I_o}{\pi n} \quad I_s = \frac{4I_d}{\pi \sqrt{2}}$$

$$i_s(t) = \frac{4I_o}{\pi \sqrt{2}} \sin(\omega t)$$

Figura 92: Resolução da questão 2 do teste 4 parte II.

f)  $\frac{P}{S} = \frac{P}{V_s I_s}$   $V_{s1} = V_s$

$$\frac{P}{S} = \frac{V_{s1} \cdot I_{s1}}{V_s \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{4}{10\pi} \approx 0,97$$

$$I_{s1} = \frac{4}{10\pi} I_d$$

$$I_s = I_d$$

g)  $P = V_{s1} \cdot I_{s1} = 230 \cdot \frac{4}{10\pi} \cdot 10 = 2070 \text{ W (CA)}$   $\cos(\alpha_{s1} - \beta_{i1}) = 0$

$$P = \bar{V}_0 \cdot I_d = 207,07 \cdot 10 \approx 2070 \text{ W (CC)}$$

2) A potência aparente possui a junção das harmônicas, enquanto a potência ativa apresenta apenas a fundamental.

Figura 93: Resolução da questão 2 do teste 4 parte III.

Measure	
Frequency	5.0000050e+001
Is	1.2732460e+001

Figura 94: Corrente Is1 de pico na FFT.

Apparent Power		
Time	From	1.0000000e-007
Time	To	1.0000000e-001
Id1 vs. V0		2.2999335e+003

Figura 95: Potência Aparente da carga

Acima é mostrado a corrente  $I_{s1}$  dividindo-a por raiz de 2 obtêm-se o valor de RMS 9 A, comprovando a solução da letra e). Com as simulações e o teste digitalizado acima pode-se notar que os resultados estão em concordância, podendo concluir que estão corretos.

## 5.2. QUESTÃO 3:

### Questão 3

O retificador trifásico a diodo mostrado na Figura 3 alimenta uma máquina CC com uma carga de torque constante  $T = 100 \text{ Nm}$ . O fluxo é mantido constante e  $K_a \phi = 1$ . Isto significa uma corrente de armadura  $I_d = 100 \text{ A}$ . A indutância da armadura da máquina,  $L_a$ , é grande o suficiente para que a corrente seja considerada constante. A tensão da rede de linha é igual a 230 V.

- Esboce a tensão de armadura  $v_d(t)$  e as correntes de linha  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  e  $i_c(t)$ . Indique quais diodos estão conduzindo.
- Calcule o valor médio da tensão CC,  $V_d$ .
- Calcule o valor eficaz da corrente da fase  $a$ .
- Calcule a corrente eficaz da componente fundamental da fase  $a$ ,  $I_{a1}$ .
- Prove que para uma forma de onda não senoidal o seu valor eficaz é sempre maior que o valor eficaz da componente fundamental.
- Liste algumas vantagens do retificador trifásico se comparado com o monofásico.

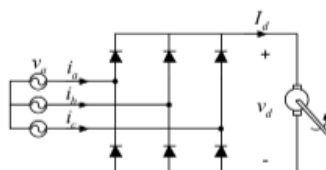
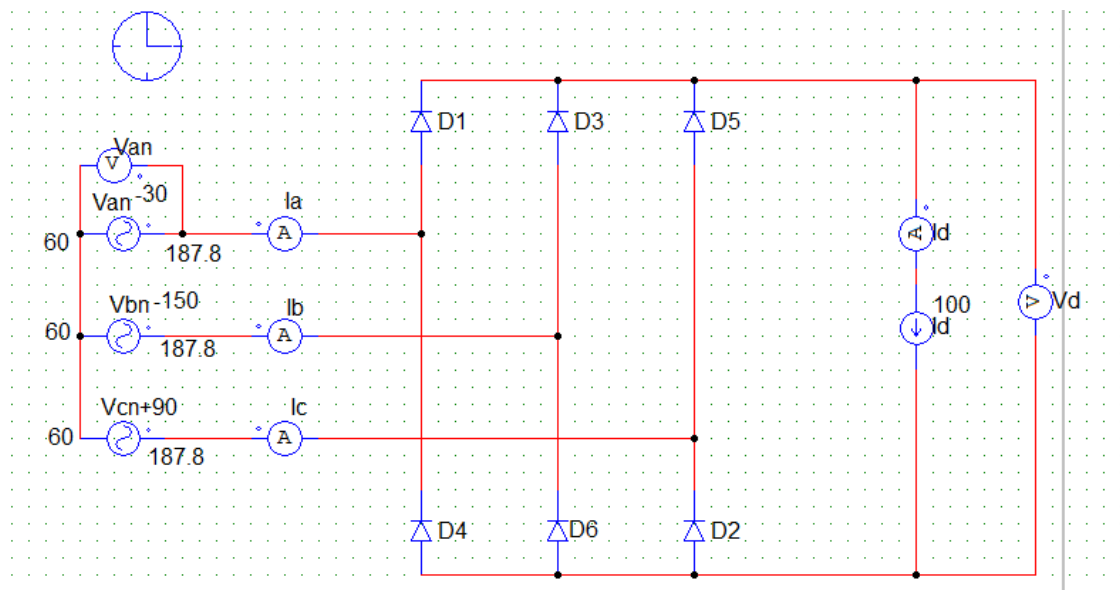
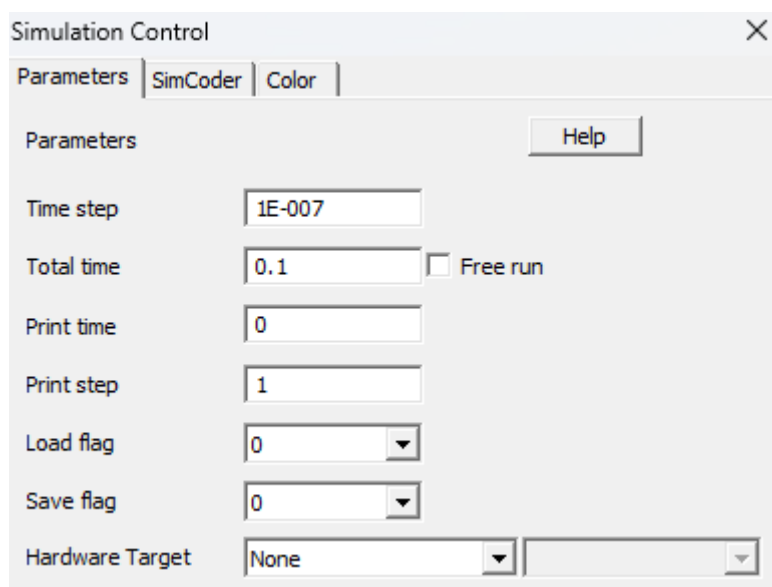


Figura 2: Circuito questão 3.

Figura 96: Dados da questão 3 do teste 4.



**Figura 97: Circuito Simulado.**



**Figura 98: Parâmetros de simulação.**

Letra a)

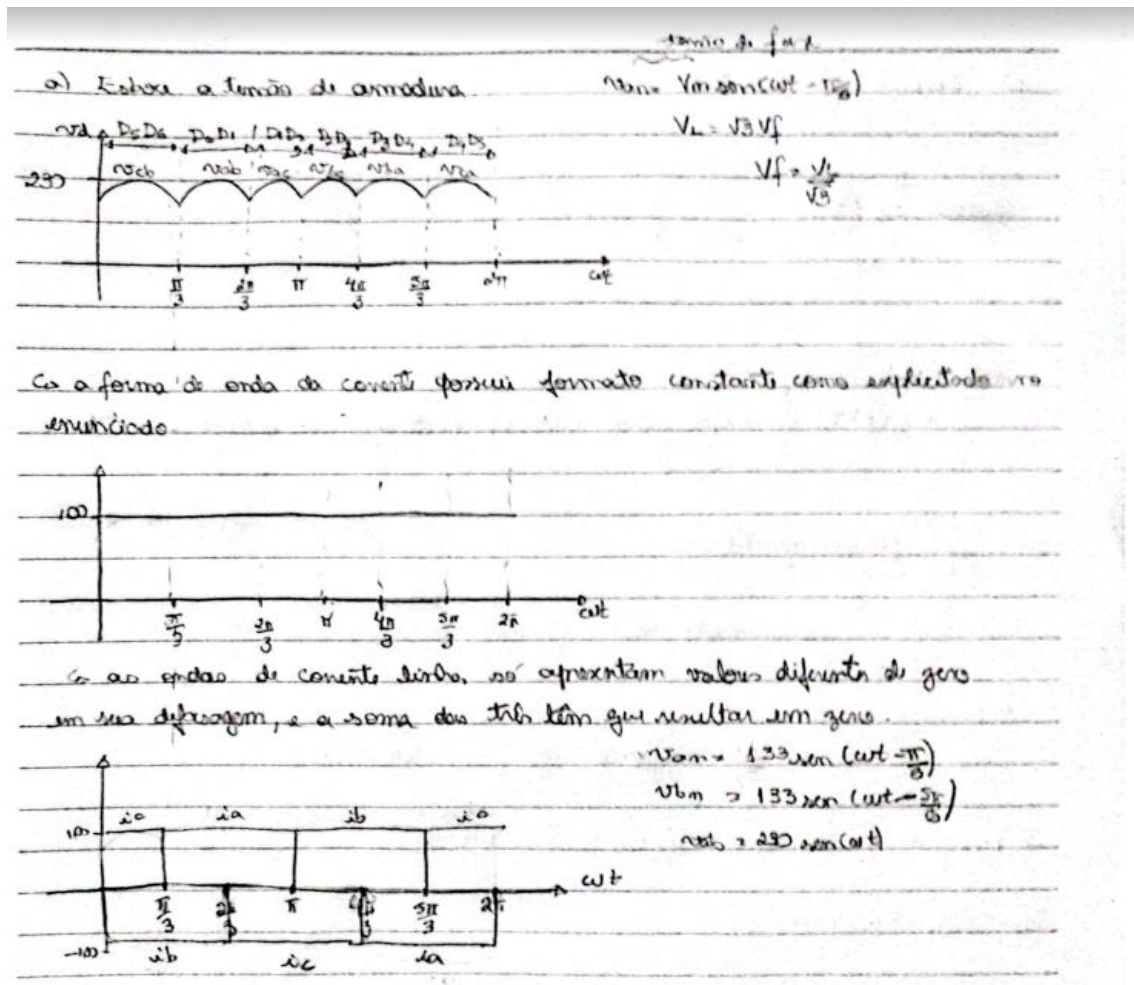


Figura 99: Resolução da questão 3 do teste 4, letra a).

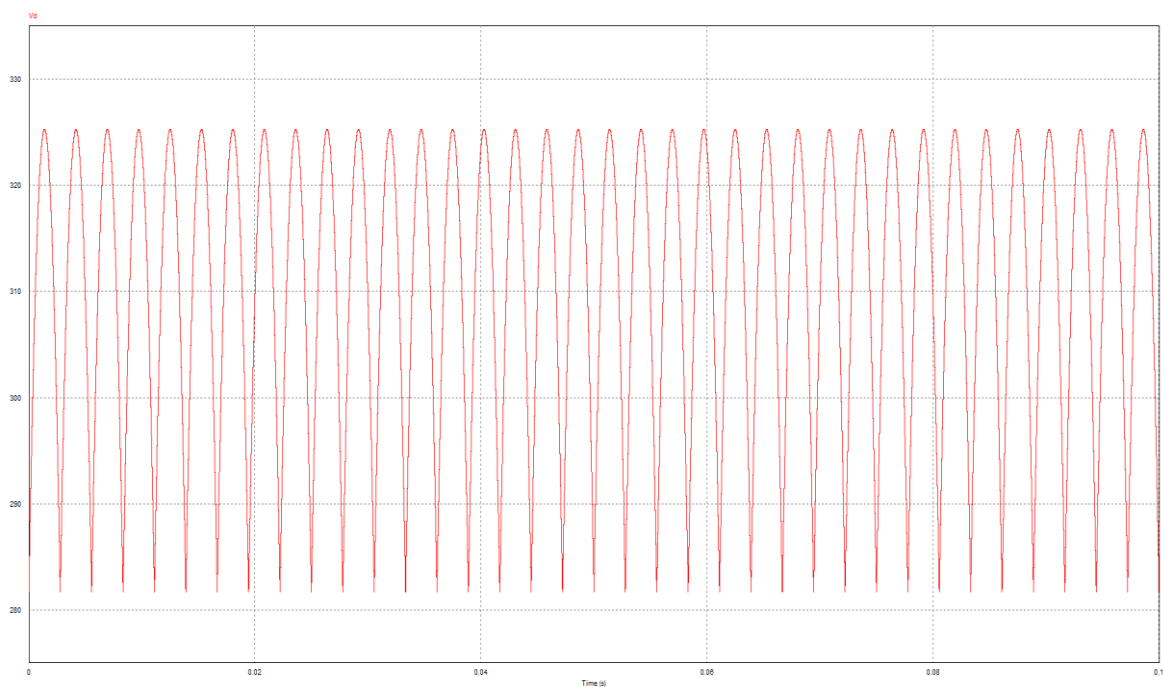
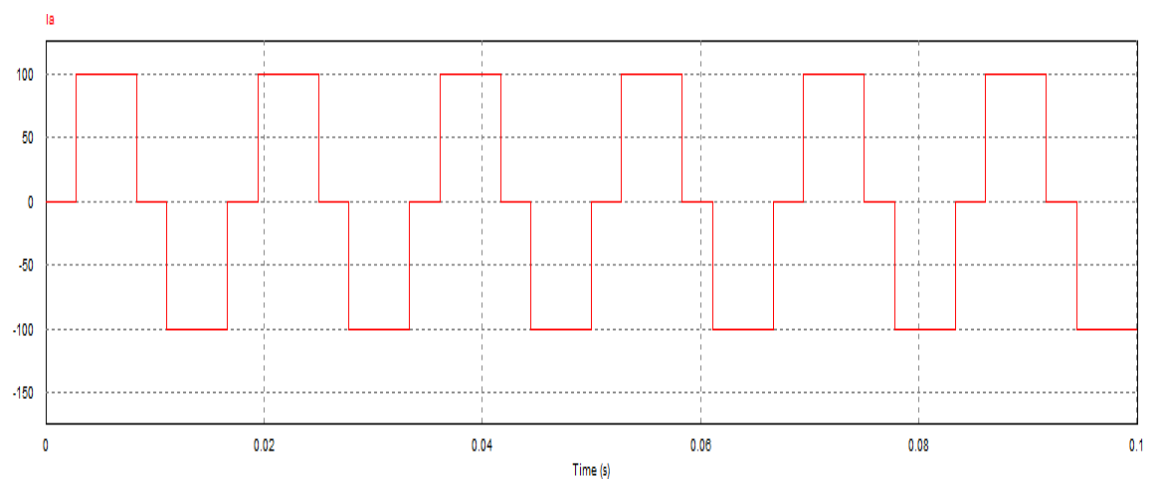
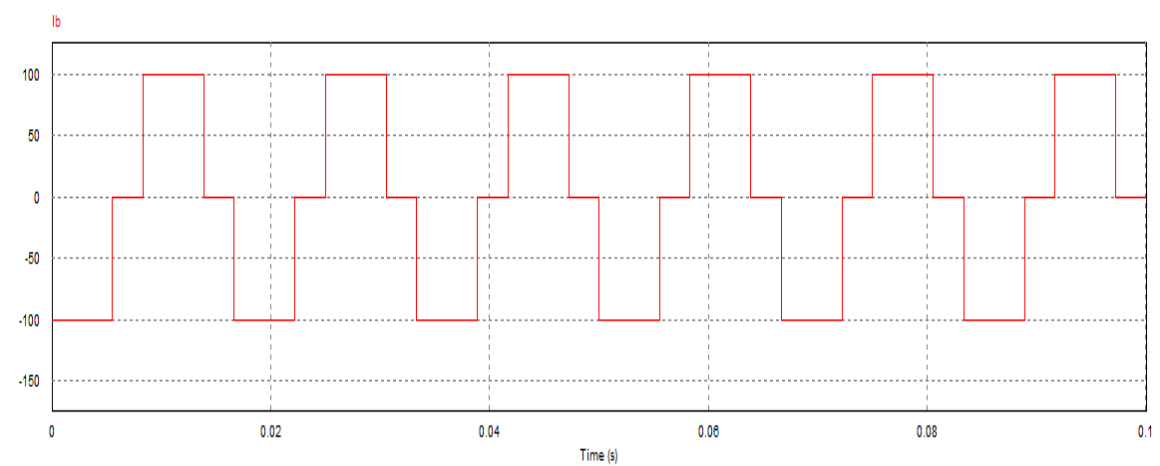


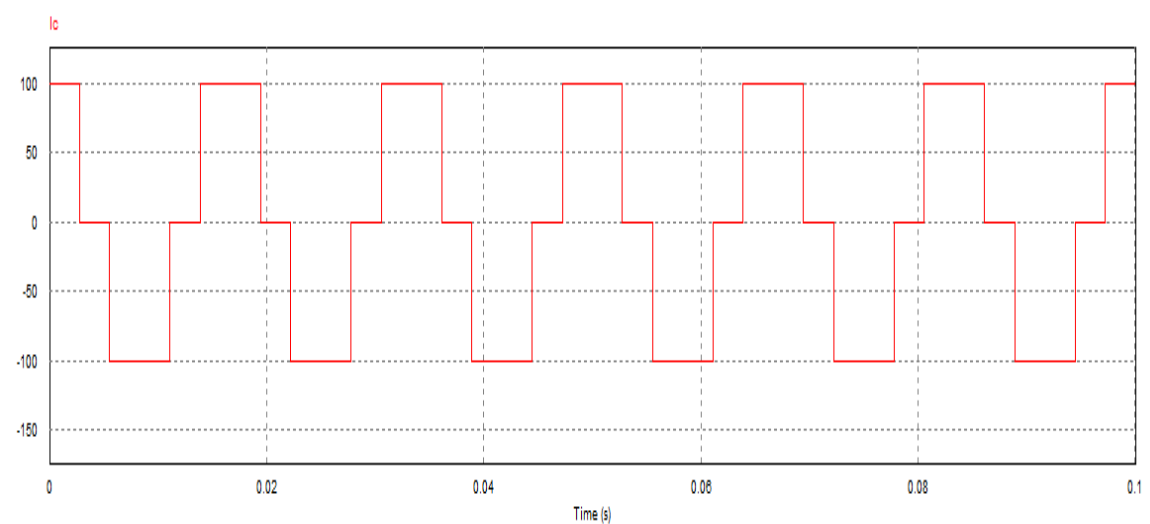
Figura 100: Forma de onda da tensão  $V_d$ .



**Figura 101: Forma de onda da corrente de linha Ia.**

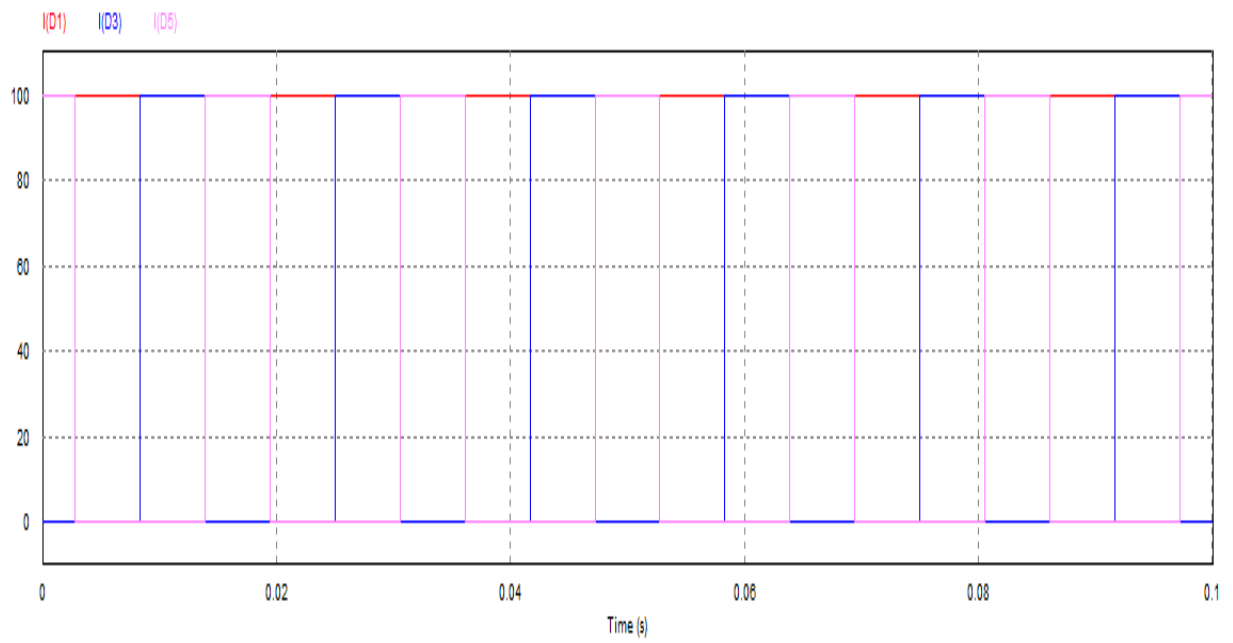


**Figura 102: Forma de onda da corrente de linha Ib.**

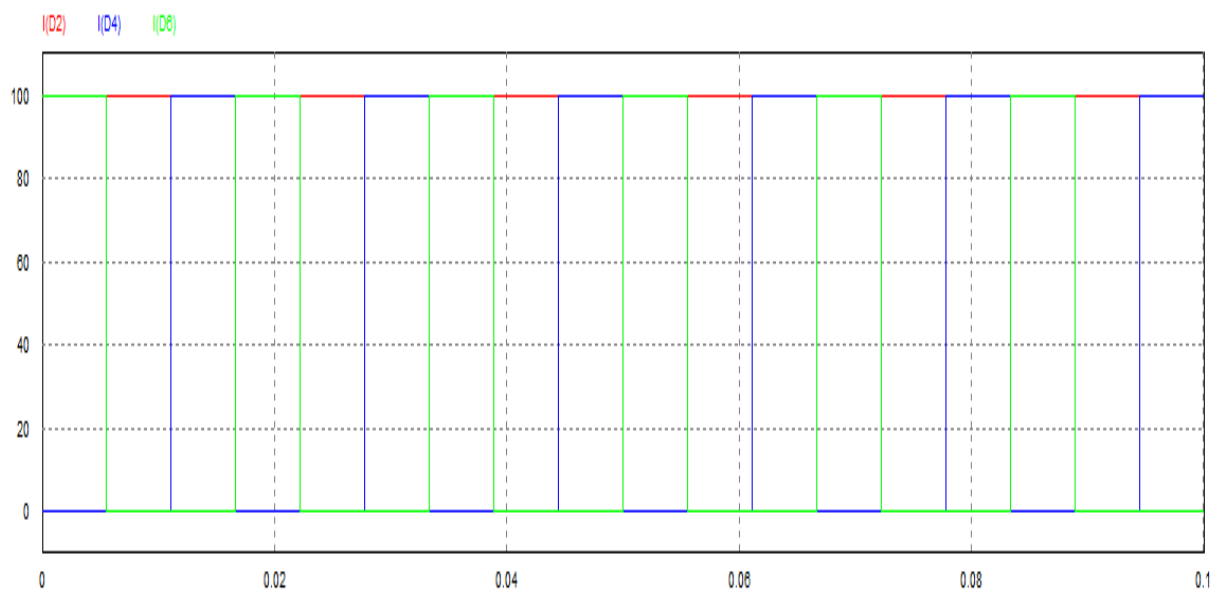


**Figura 103: Forma de onda da corrente de linha Ic.**





**Figura 104: Formas de onda das correntes dos diodos D1, D3 e D5.**



**Figura 105: Formas de onda das correntes dos diodos D2, D4 e D6.**

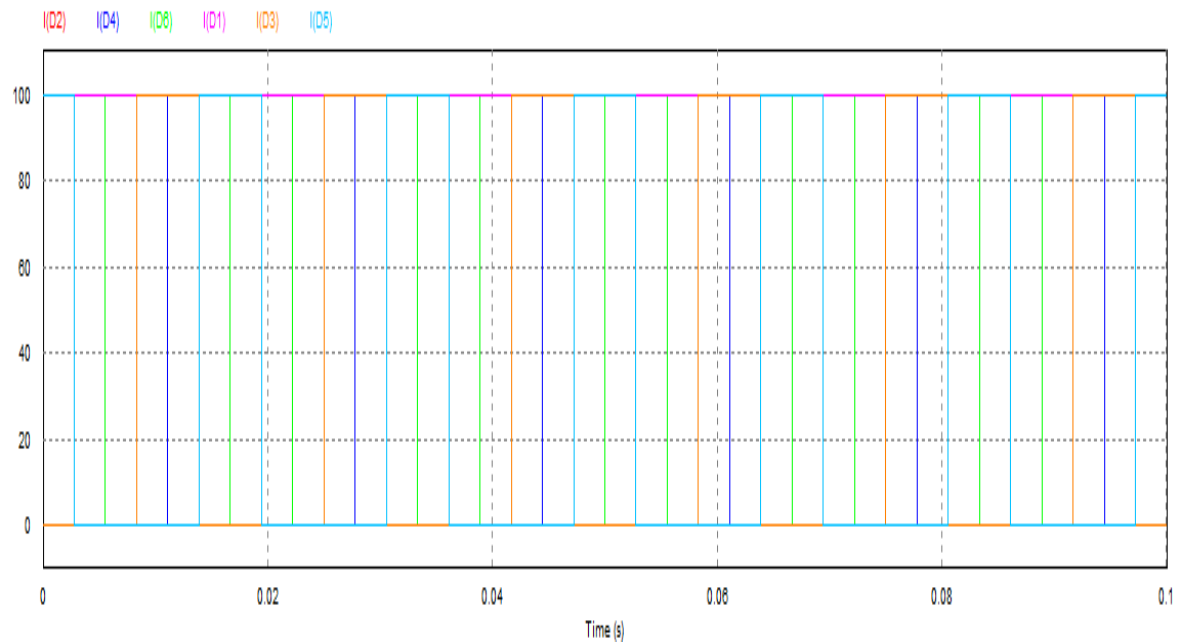


Figura 106: Formas de onda das correntes dos diodos D1, D2, D3, D4, D5 e D6.

Letra b)

$$b) \bar{V}_d = \frac{1}{T} \int_0^T v_d dt \Rightarrow \bar{V}_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} 230 \sin(\omega t) d(\omega t) \Rightarrow \frac{3}{\pi} \cdot 230 \left[ -\cos(\omega t) \right]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \\ \bar{V}_d = 219,63 \sqrt{2} \Rightarrow 310,609 \text{ V}$$

Figura 107: Resolução da questão 3 do teste 4, letra b).

Average Value		x
Time	From	1.0000000e-007
Time	To	1.0000000e-001
Vd		3.1061637e+002

Figura 108: Valor médio simulado da tensão Vd.

Letra c)

$$c) I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} I_d^2 dt} \rightarrow I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \Rightarrow 81,65A,$$

Figura 109: Resolução da questão 3 do teste 4, letra c).

RMS Value			
Time	From		1.0000000e-007
Time	To		1.0000000e-001
ia			8.1649558e+001

Figura 110: Valor da corrente ia RMS.

Letra d)

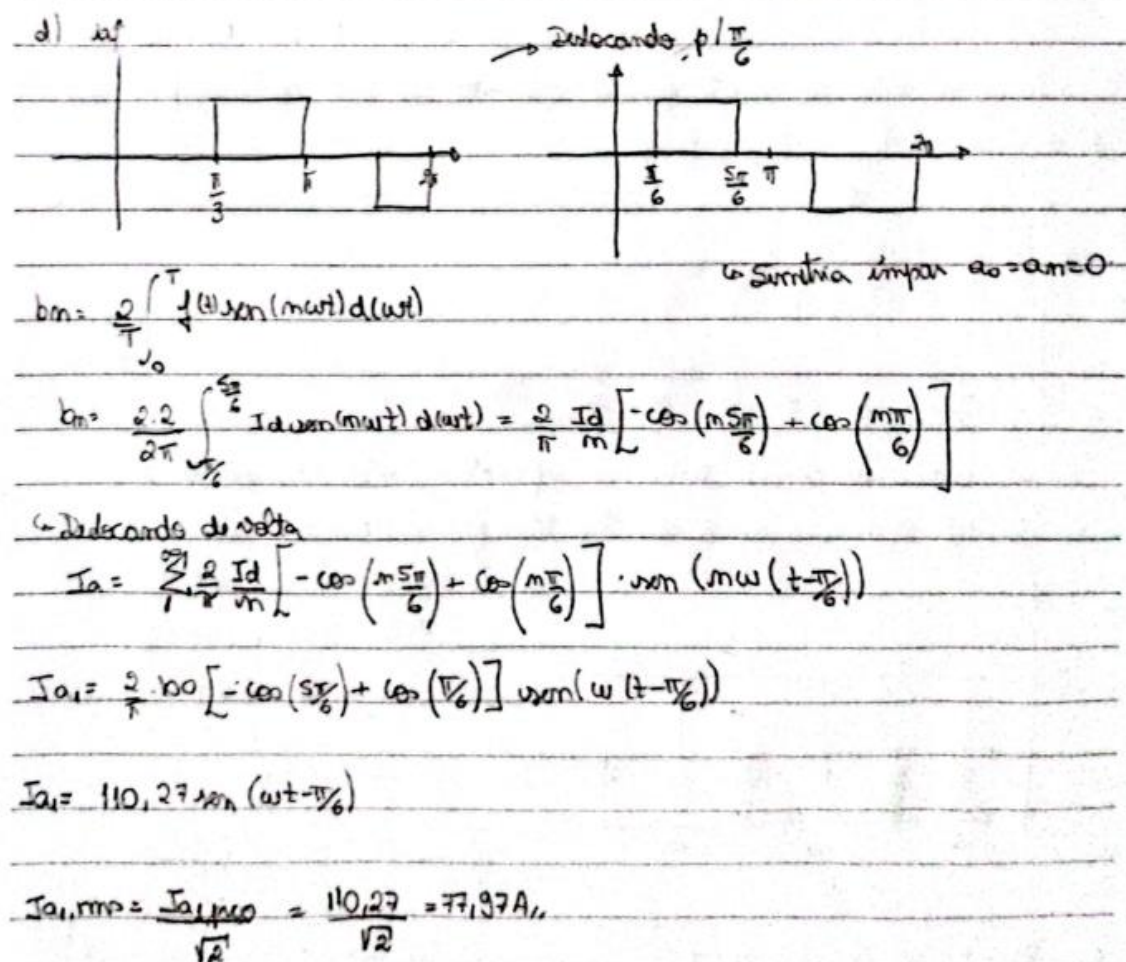
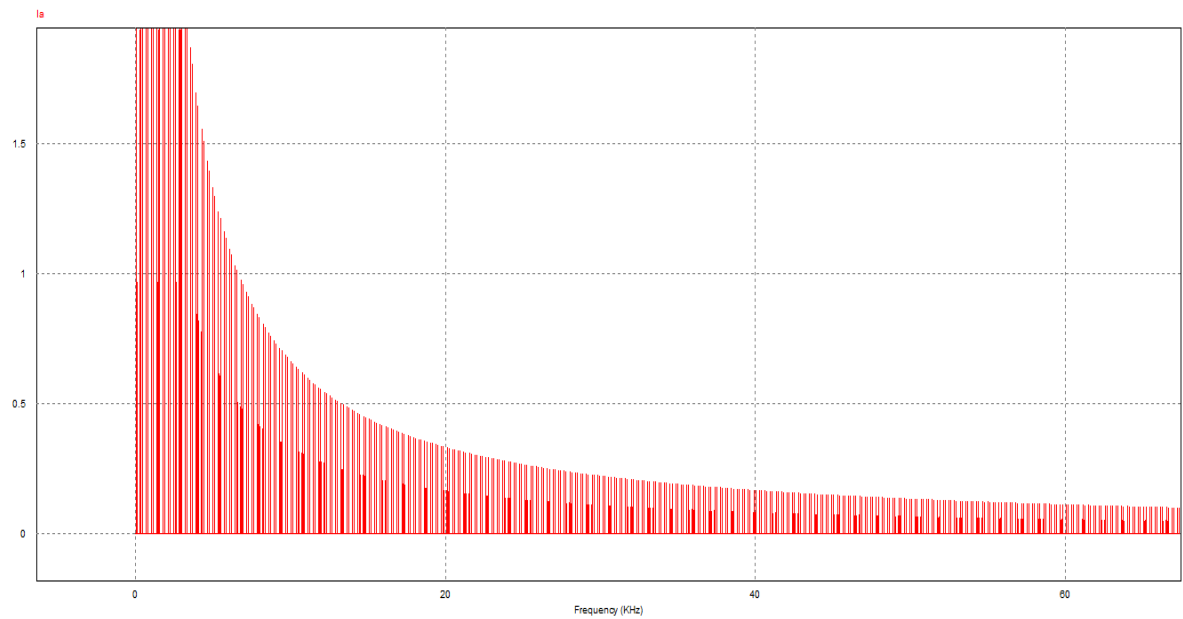
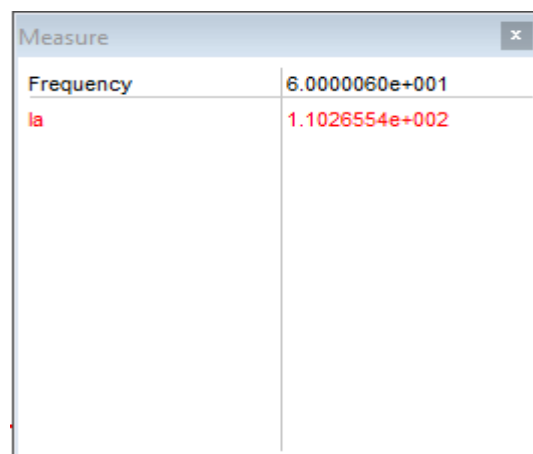


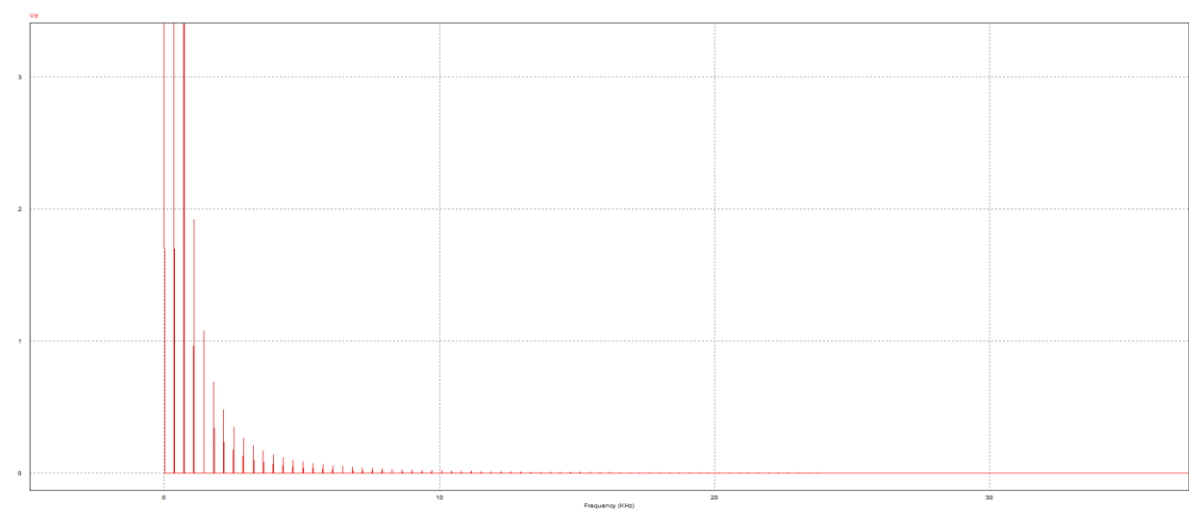
Figura 111: Resolução da questão 3 do teste 4, letra d).



**Figura 112: FFT da corrente  $i_a$  em escala linear.**



**Figura 113: Valor da corrente  $i_{a1}$  simulada.**



**Figura 114: FFT da Tensão  $V_d$  em escala linear.**

### Letra e) e Letra f)

e)  $V_{rms} > V_{1rms}$

Se uma tensão periódica for a soma de duas formas de onda periódicas  $v(t) = v_1(t) + v_2(t)$ , o valor rms de  $v(t)$  é determinado como:

Considera  $v_1$  como a componente fundamental e  $v_2$  como a soma das demais componentes harmónicas.

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (v_1 + v_2)^2 dt \Rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T (v_1^2 + 2v_1v_2 + v_2^2) dt$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1^2 dt + \frac{2}{T} \int_0^T v_1v_2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_2^2 dt$$

ortogonal

$$V_{1rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1^2 dt \quad V_{2rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_2^2 dt$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{2rms}^2} \quad \text{Como } V_{2rms} > 0$$

$$\boxed{V_{rms} > V_{1rms}}$$

f) A potência fornecida pelo utilizador típico é maior.

A tensão de ripple é menor, já que a distância entre os zeros é menor se compararmos a morfologia. Isso faz com que a tensão seja mais próxima da tensão contínua.

Figura 115: Resolução da questão 3 do teste 4, letra e) e a letra f).

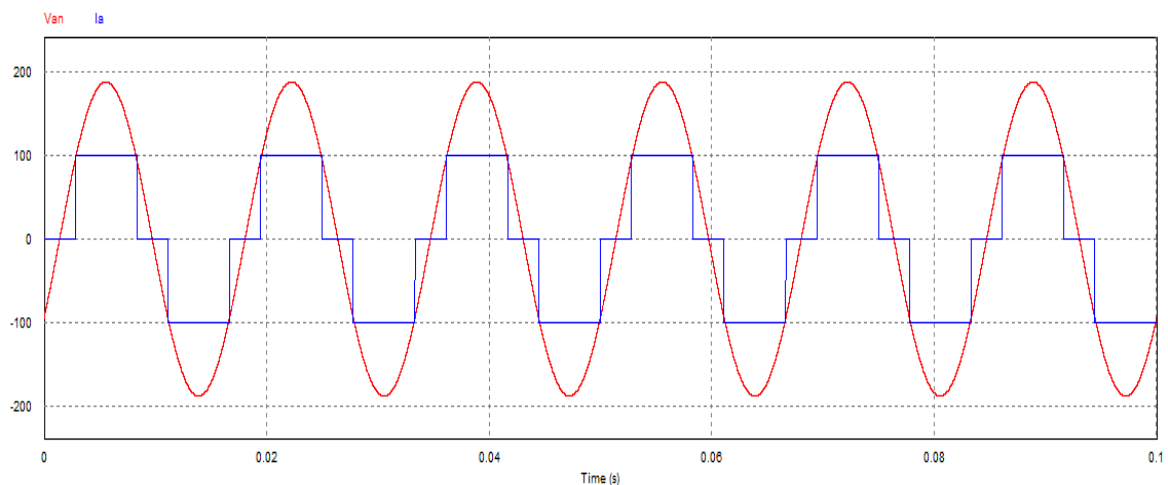


Figura 116: Formas de Onda de Van e Ia

Real Power			x
Time	From	1.0000000e-007	
Time	To	1.0000000e-001	
Van vs. Ia		1.0353940e+004	

Figura 117: Potência Ativa média de Van.

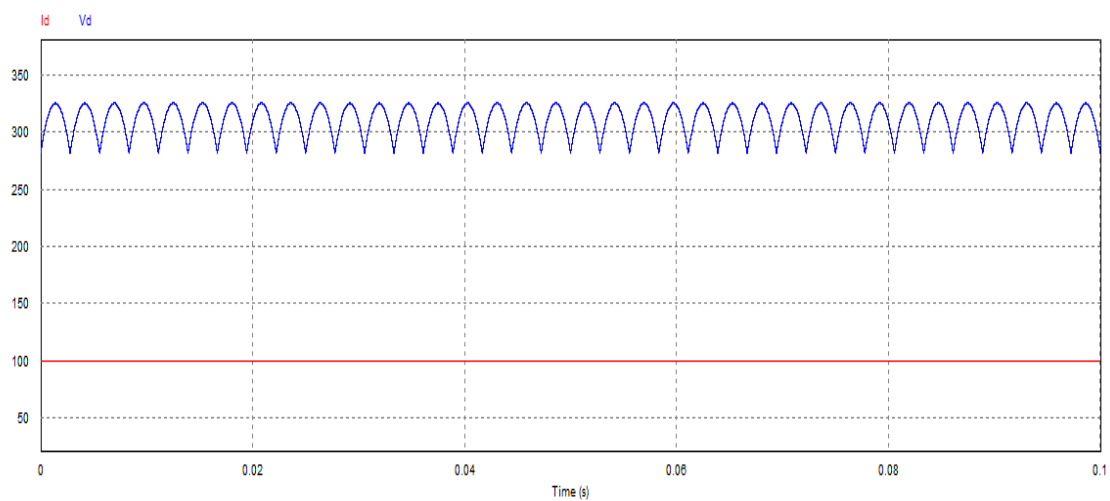


Figura 118: Formas de onda da tensão Vd e corrente Id.

Real Power			x
Time	From	1.0000000e-007	
Time	To	1.0000000e-001	
Id vs. Vd		3.1061637e+004	

Figura 119: Potência Ativa média da carga.

Após a análise de todos os gráficos das simulações é perceptível que o teste realizado tem paridades à simulação, o que confirma as respostas obtidas durante os cálculos. Sobre as questões discursivas, o da tensão eficaz é perceptível pela FFT da tensão  $V_d$ , e a questão da potência pode ser vista nos gráficos de potência ativa média da fonte  $V_{an}$  em comparação com a carga de tensão  $V_d$ , sendo três vezes maior do que da fase.