

Electrónica de Potência

Sérgio Manuel Salazar dos Santos, N.º: 1020881

2 de Julho de 2020

Conteúdo

I	Problema 2 - A1	2
.1	Corrente Alternada circuito <i>RLE</i> com interruptor.	3
II	Problema 2 - A2	1
.1	Corrente Alternada circuito <i>RLE</i> com tiristor.	2
III	Equações	1

Parte I

Problema 2 - A1

.1 Corrente Alternada circuito *RLE* com interruptor.

Considere o circuito da Figura 1 Suponha V_s = tensão da rede eléctrica nacional (240V 50Hz).

1. O interruptor é fechado em $t = 0$, quando a fase da senoide apresenta o ângulo α . (α é também conhecido como ângulo de disparo, nomeadamente quando se utiliza um tiristor no lugar do interruptor).

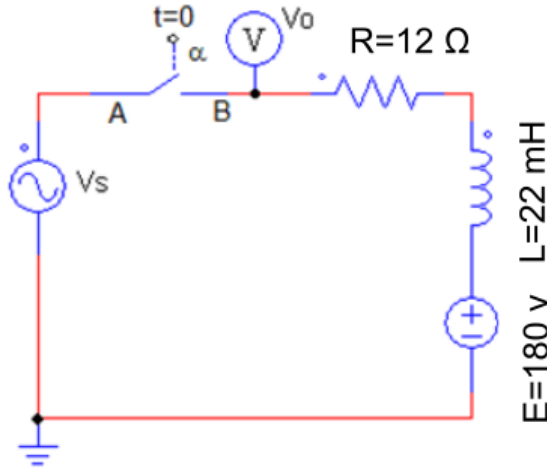


Figura 1: Circuito *RLE* comutado

- (a) Deduza as expressões genéricas*(1) para $V_R(\omega t)$, $V_L(\omega t)$ e $I_o(\omega t)$, especificando as componentes no regime transitório ($i_n(\omega t)$) e permanente ($i_p(\omega t)$).

Equação do circuito :

$$V_{m\acute{a}x} \sin(\omega t + \alpha) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E \quad (1)$$

Sabendo que,

$$i(t) = C_T e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_{m\acute{a}x}}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{E}{R} \quad (2)$$

mas queremos que as funções deduzidas sejam dependente de ωt temos que recorrer a mudança de variável

$$I(\omega t) = \underbrace{C_T e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t}}_{i_n(\omega t)} + \underbrace{\frac{V_{m\acute{a}x}}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{E}{R}}_{i_p(\omega t)} \quad (3)$$

tomamos em conta que as condições iniciais são nulas, isto é, $I_{0-} = 0$, que é o mesmo que $\omega t = 0$.

$$C_T = \frac{E}{R} - \frac{V_{m\acute{a}x}}{Z} \sin(\alpha - \phi) \quad (4)$$

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (5)$$

também

$$C_T = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R^2 + (\omega L)^2} (L\omega \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)) + \frac{E}{R} \quad (6)$$

logo,

$$V_R(\omega t) = R \times I_o(\omega t) \quad (7)$$

$$V_L(\omega t) = L \frac{dI_o(\omega t)}{d\omega t} \times \omega \quad (8)$$

$$= \frac{\omega L V_{máx}}{\bar{Z}} \cos(\omega t + \alpha - \phi_p) - R C_T e^{-\frac{R}{\omega L} \omega t}$$

$$I_o(\omega t) = C_T e^{-\frac{R}{L\omega} \omega t} + \frac{V_{máx}}{\bar{Z}} \sin(\omega t + \alpha - \phi) - \frac{E}{R} \quad (9)$$

$$i_n(\omega t) = C_T e^{-\frac{R}{L\omega} \omega t} \quad (10)$$

$$i_p(\omega t) = \frac{V_{máx}}{\bar{Z}} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{E}{R} \quad (11)$$

$$(12)$$

- (b) Determine a constante de tempo do circuito (τ).

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{22 \times 10^{-3}}{12} \approx 0.001833 \text{ sec},$$

$$\text{e o seu período da fonte sinusoidal, } T_o = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ sec}$$

- (c) Supondo que o interruptor é fechado 6ms após o início da sinusóide, determine o ângulo de disparo α ;

$$\alpha = \omega \times 6 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\alpha = 108^\circ$$

- (d) Para o ângulo α determinado em c) e socorrendo-se do **Excel** (ou equivalente, **Open Office**), obtenha um gráfico que inclua as formas de onda de $V_s(\omega t)$, $V_R(\omega t)$, $V_L(\omega t)$ e E , e um outro gráfico com a forma de onda de $I_o(\omega t)$, e com as componentes no regime transitório ($i_n(\omega t)$) e permanente ($i_p(\omega t)$).

$$V_s(\omega t) = \frac{V_{máx}}{\bar{Z}} \sin(\omega t + \alpha); \quad V_R(\omega t) = R I_o(\omega t); \quad V_L(\omega t) = L \frac{dI_o(\omega t)}{d\omega t} \times \omega; \quad E = 180$$

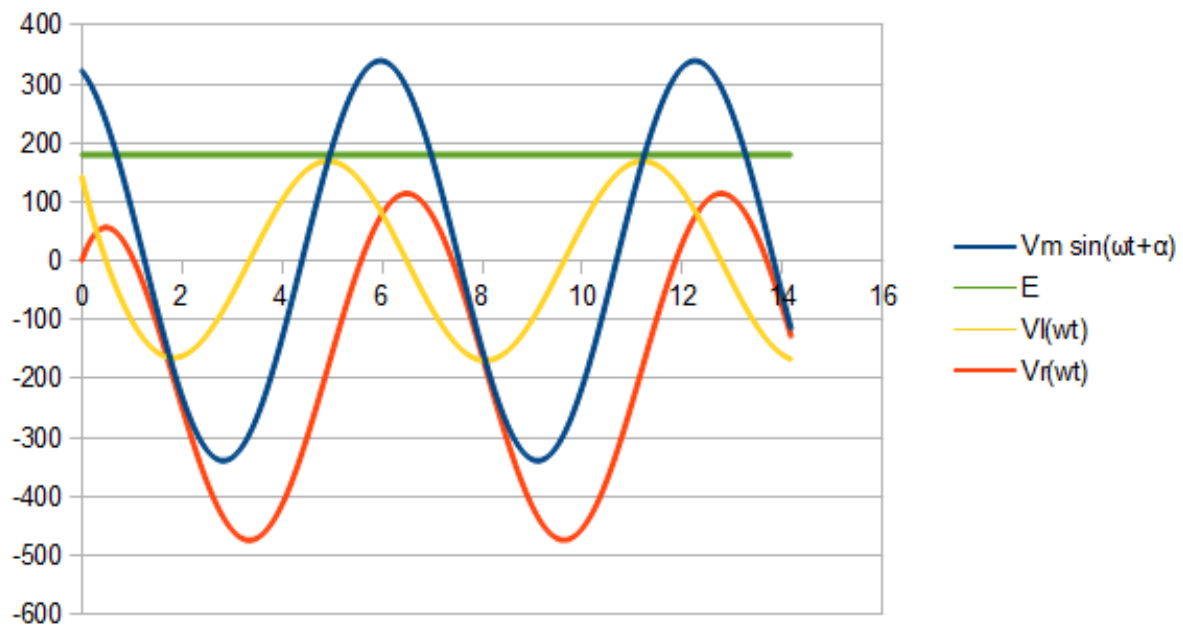


Figura 2: Tensões

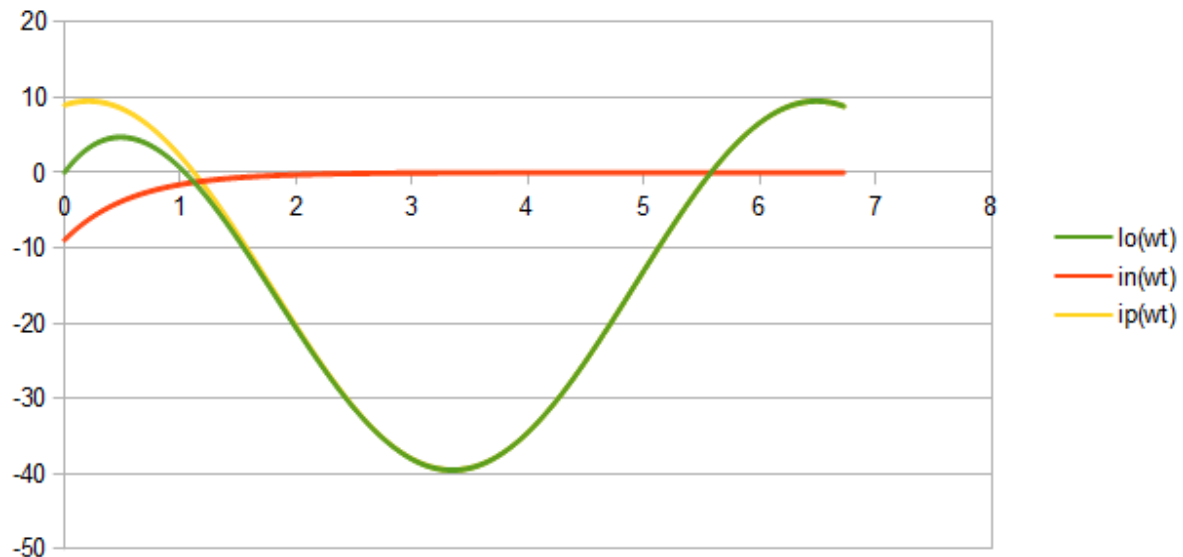


Figura 3: Correntes

2. Suponha agora que entre A e B é colocado um diodo, com o ânodo ligado a A, e ainda que $E = 0$.

- (a) Socorrendo-se do **Excel** determine o tempo de condução t_c do diodo; e o ângulo correspondente de condução γ ;

O diodo está em condução pelos valores aproximados da tabela do **LibreOffice** nos intervalos de $\omega t = 0 \text{ rad}$ até $\omega t \approx 1,7303419 \text{ rad}$ e de $\omega t \approx 4,39946745 \text{ rad}$ até $\omega t = 2\pi \text{ rad}$

Portanto este conduz no total $\omega t \approx 3,614059757 \text{ rad}$ que dá o total de $\gamma \approx 207,070371^\circ$ (graus) em condução durante um período.

Como $\omega t \approx 3,614 \text{ rad}$ o tempo de condução $t_c = \frac{\omega t}{\omega}$, ou seja, $t_c = \frac{3,614}{2\pi 50} \approx 11,50 \text{ ms}$

- (b) Obtenha um gráfico que inclua as formas de onda de $V_s(\omega t)$, $V_R(\omega t)$, $V_L(\omega t)$ e E , e outro gráfico com a forma de onda de $I_o(\omega t)$ e com as componentes no regime transitório ($i_n(\omega t)$) e permanente ($i_p(\omega t)$).

Condições iniciais para $\omega t = 0 \text{ rad}$ até $\omega t \approx 1,7303419 \text{ rad}$ e $\omega t \approx 4,39946745 \text{ rad}$ até $\omega t = 2\pi \text{ rad}$, Sabendo que para condições iniciais nulas, $i_p(0^-) = -i_n(0^-)$, e $\phi_n \approx 0,474$, isto é o avanço da corrente transitória.

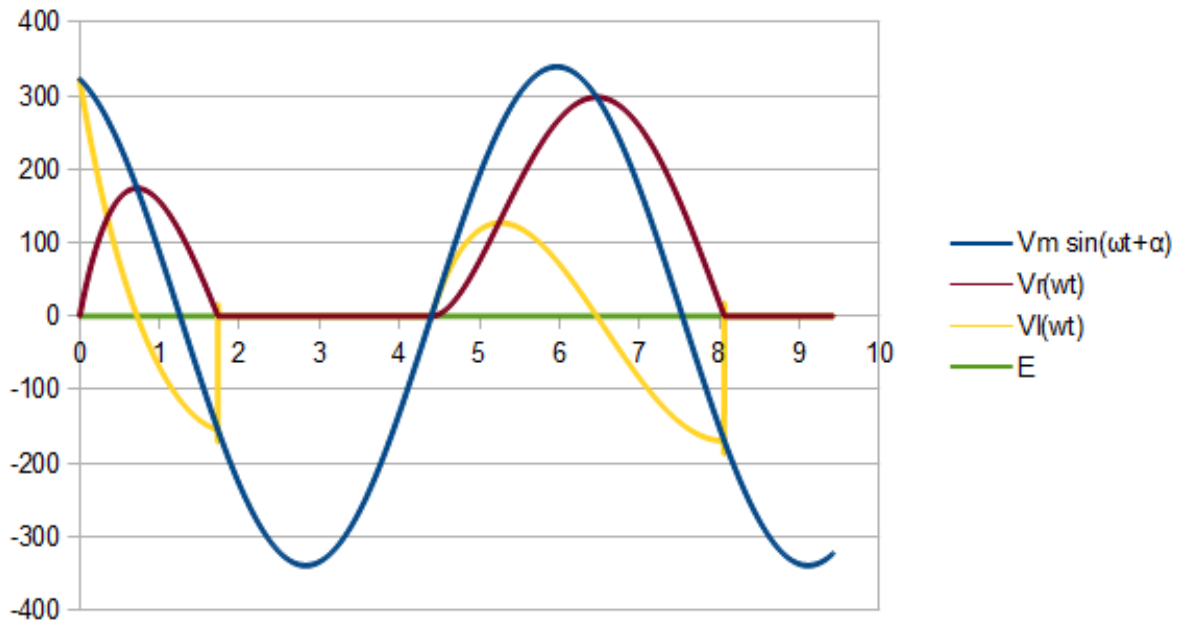


Figura 4: Tensões



Figura 5: Correntes

- (c) Calcule*(2) os valores médios da tensão e da corrente na carga V_{oAV} e I_{oAV} ; Cálculos efetuados utilizando a ferramenta **wxMaxima**.

Intervalo $[0 ; 2\pi]$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,730; \alpha \approx 1,885;$

$\omega t = 4,399; \rightarrow \omega t = 2\pi; \alpha \approx 1.885;$

$$V_{oAV} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{1,730} \sqrt{2} 240 \sin(\omega t + \alpha) d\omega t + \int_{4,399}^{2\pi} \sqrt{2} 240 \sin(\omega t + \alpha) d\omega t \right) \quad (13)$$

$$= 102.097$$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,730; \alpha \approx 1,885;$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,885; \alpha = 0;$

$$I_{oAV} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{1,730} I_o(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=1,885} + \int_0^{1,885} I_o(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=0} \right) \quad (14)$$

$$=6,266$$

(d) Calcule*(2) os valores eficazes da tensão e da corrente na carga V_{oRMS} e I_{oRMS} ;

Intervalo $[0 ; 2\pi]$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,730; \alpha \approx 1,885;$

$\omega t = 4,399; \rightarrow \omega t = 2\pi; \alpha \approx 1,885;$

$$V_{oRMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{1,730} (\sqrt{2} 240 \sin(\omega t + \alpha))^2 d\omega t + \int_{4,399}^{2\pi} (\sqrt{2} 240 \sin(\omega t + \alpha))^2 d\omega t \right)} \quad (15)$$

$$=171,523$$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,730; \alpha \approx 1,885;$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,885; \alpha = 0;$

$$I_{oRMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{1,730} I_o^2(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=1,885} + \int_0^{1,885} I_o^2(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=0} \right)} \quad (16)$$

$$=9,746$$

(e) Calcule*(2) a potência entregue à carga RLE .

Intervalo $[0 ; 2\pi]$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,730; \alpha \approx 1,885;$

$\omega t = 0; \rightarrow \omega t \approx 1,885; \alpha = 0;$

$$P_{oAV} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{1,730} V_o(\omega t) I_o(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=1,885} + \int_0^{1,885} V_o(\omega t) I_o(\omega t) d\omega t \Big|_{\alpha=0} \right) \quad (17)$$

$$P_{o1} = 4286.89493572789$$

$$P_{o2} = 5125.162040769396$$

$$P_o = 9412.056976497286$$

$$P_{oAV} = 1497.975392472102$$

Resumo

Foi deduzido as expressão matemáticas complexas como demonstra a Parte III, também foi feito uma análise rigorosa recorrendo ao **LibreOffice** obtendo as formas de ondas, observando seu comportamento quanto aos desfazamentos e condução, e os valores calculados são próximos dos obtidos pelo simulador **PSIM**.

Parte II

Problema 2 - A2

.1 Corrente Alternada circuito *RLE* com tiristor.

1. Recorrendo ao **PSIM**, confirme todas as formas de onda e valores obtidos na Parte I

1d)

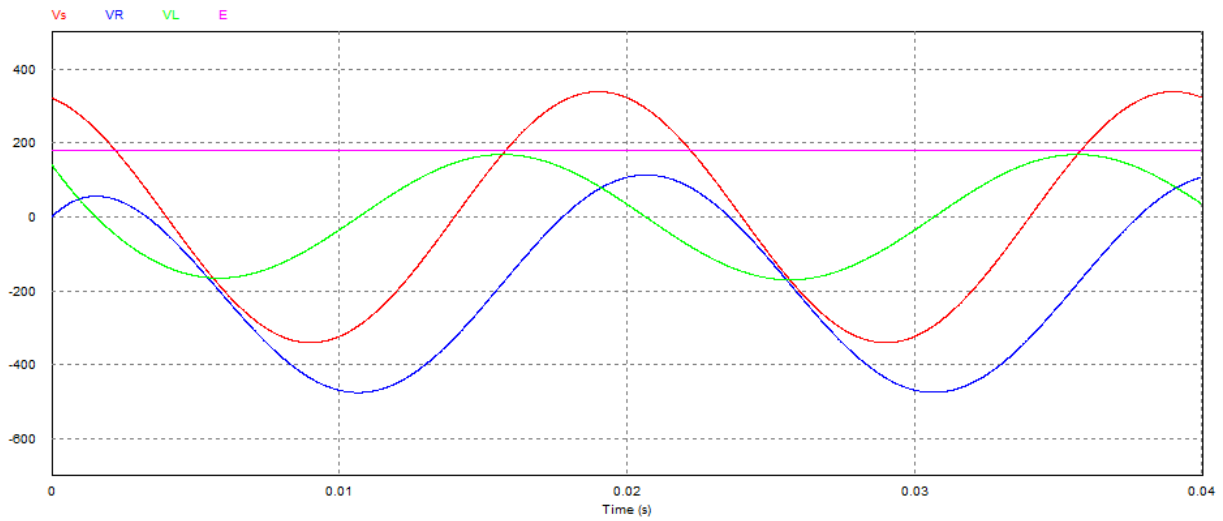


Figura 6: Tensões

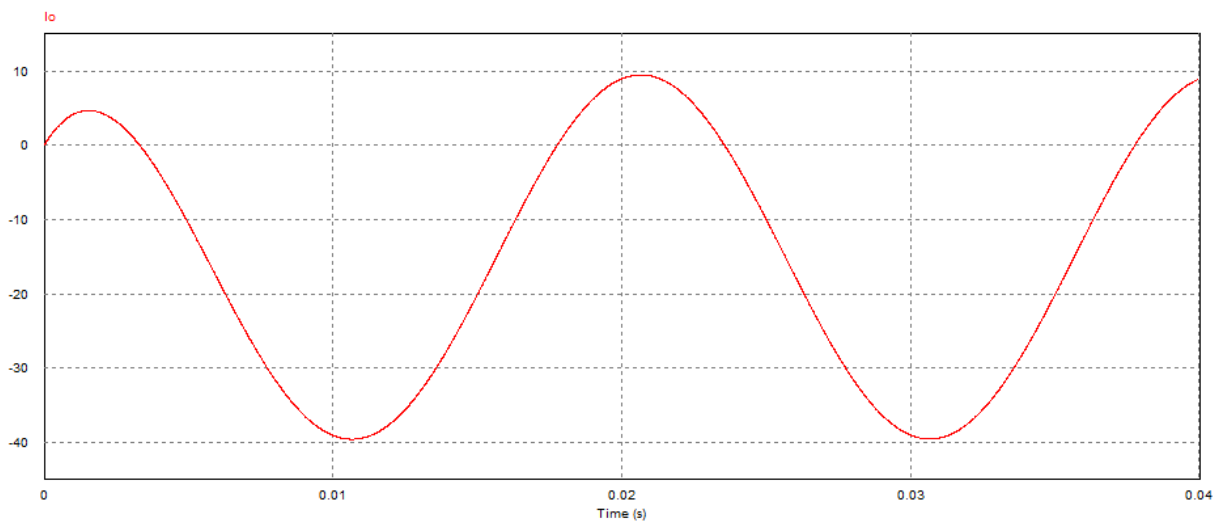


Figura 7: Corrente

2b)

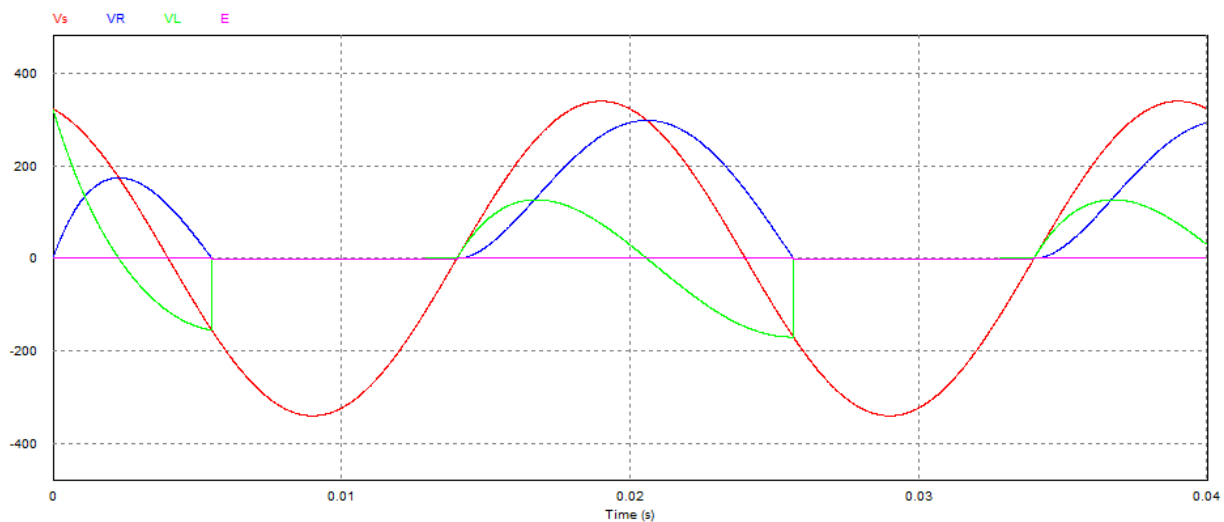


Figura 8: Tensões

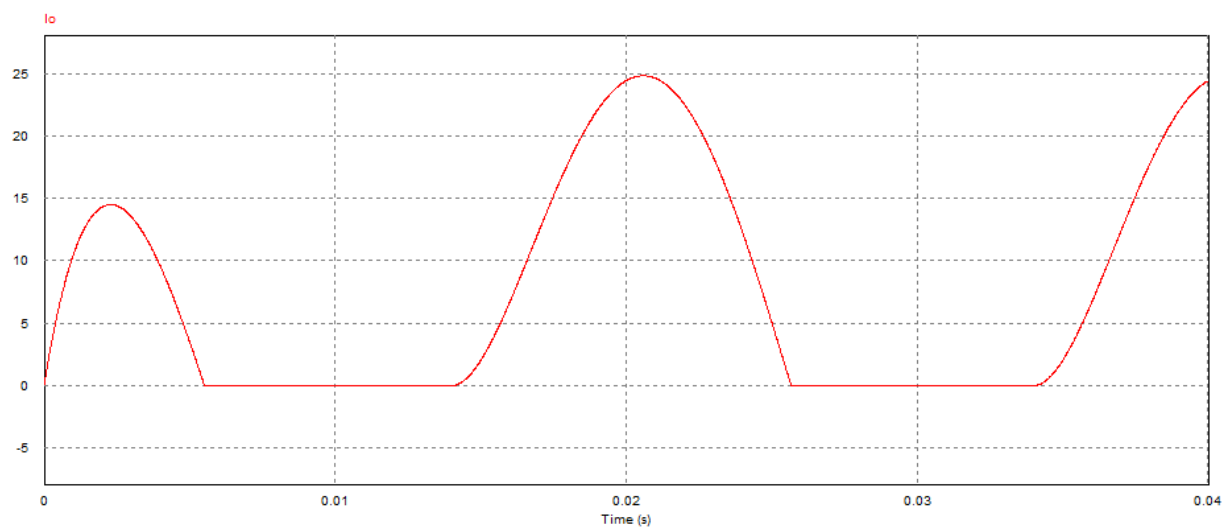


Figura 9: Corrente

Considere agora o circuito da Figura 10. Suponha V_s = tensão da rede eléctrica nacional. O tiristor é disparado para o ângulo α .

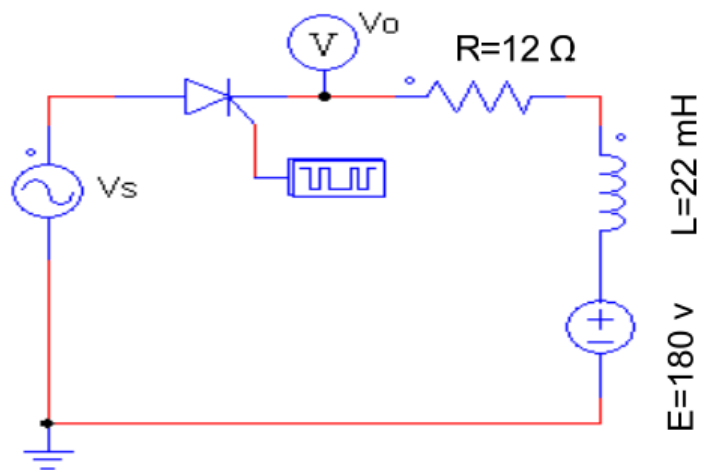


Figura 10: Circuito RLE tiristorizado

2. Considere $\alpha = 60$

- (a) Obtenha, socorrendo-se do **Excel**, as formas de onda para as grandezas $I_o(\omega t)$, $V_s(\omega t)$, $V_o(\omega t)$, $V_R(\omega t)$ e $V_L(\omega t)$;

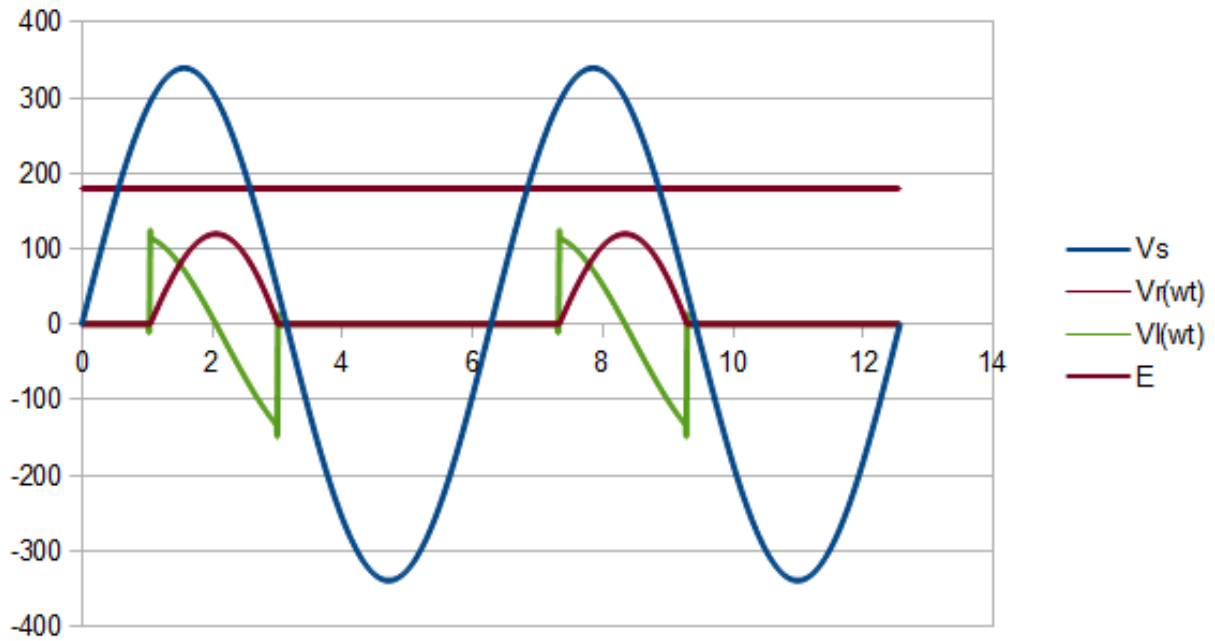


Figura 11: Tensões

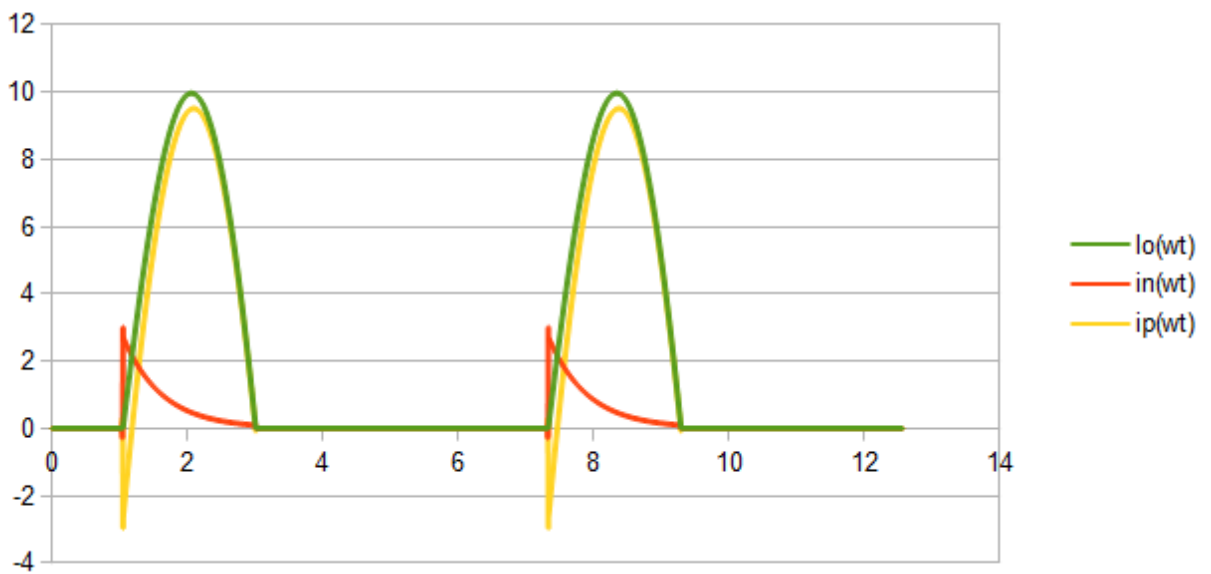


Figura 12: Correntes

- (b) Repita a alínea b), mas com $\alpha = 90$;

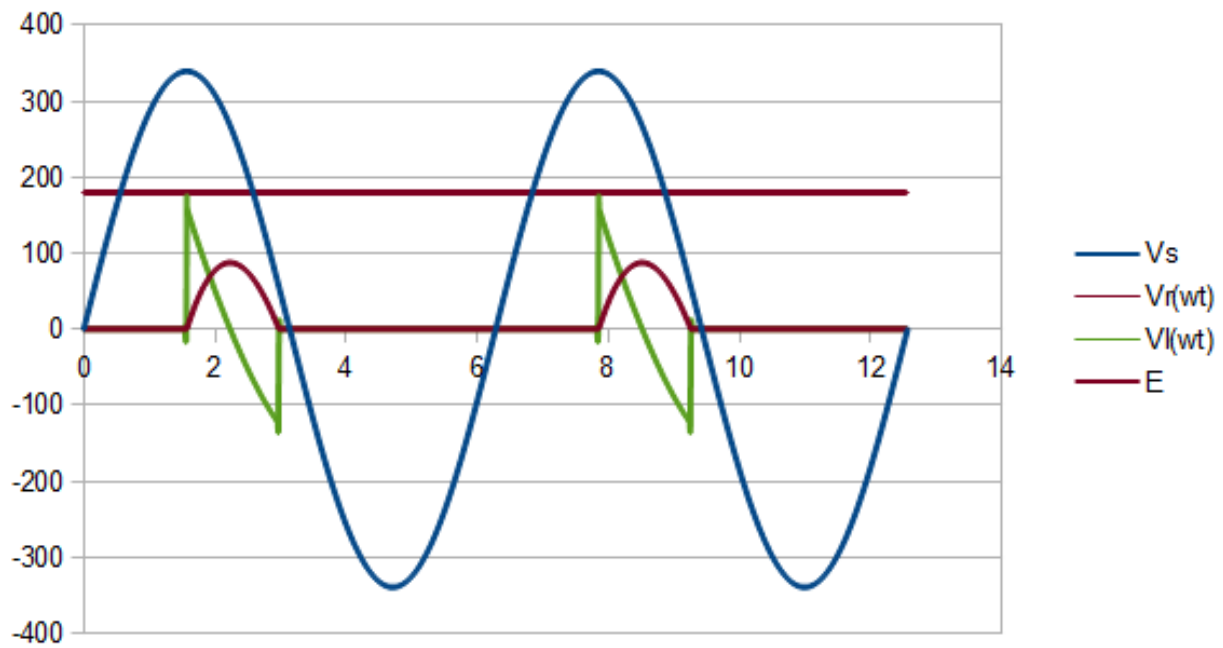


Figura 13: Tensões

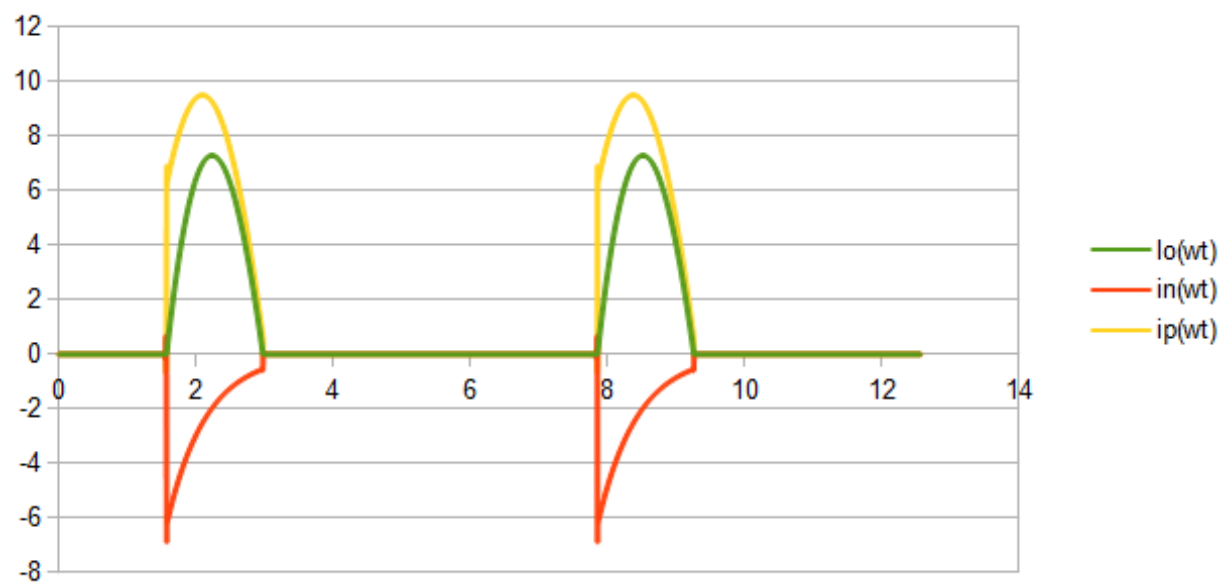


Figura 14: Correntes

(c) Repita a alínea b), mas com $\alpha = 120$;

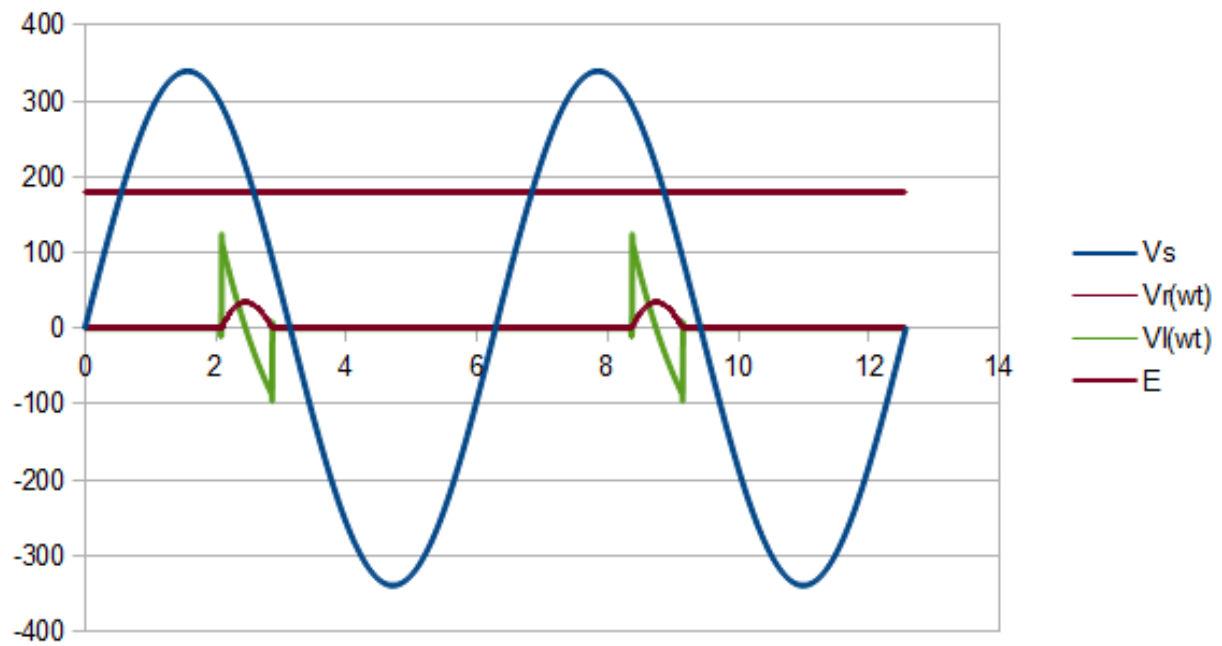


Figura 15: Tensões

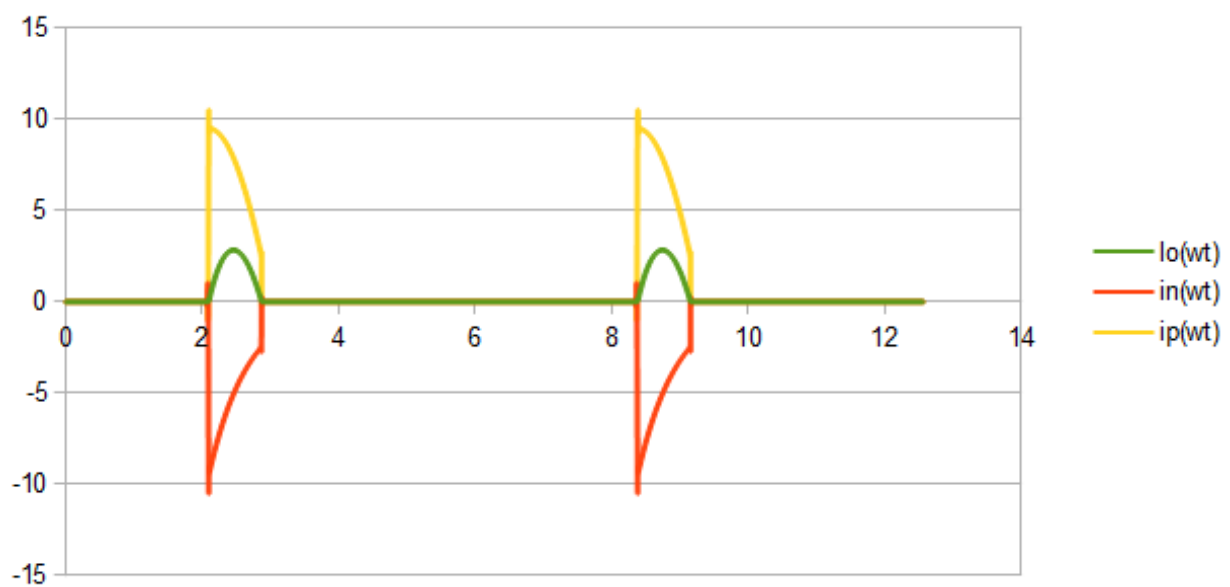


Figura 16: Correntes

(d) Repita a alínea b), mas com $\alpha = 30^\circ$;

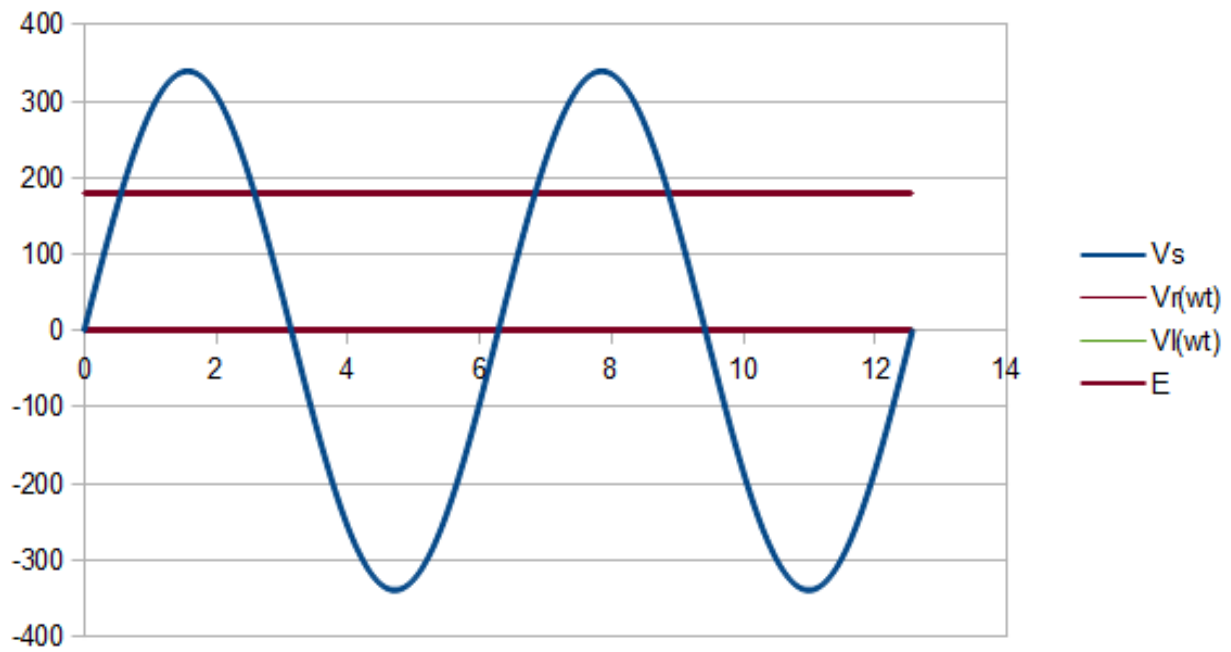


Figura 17: Tensões

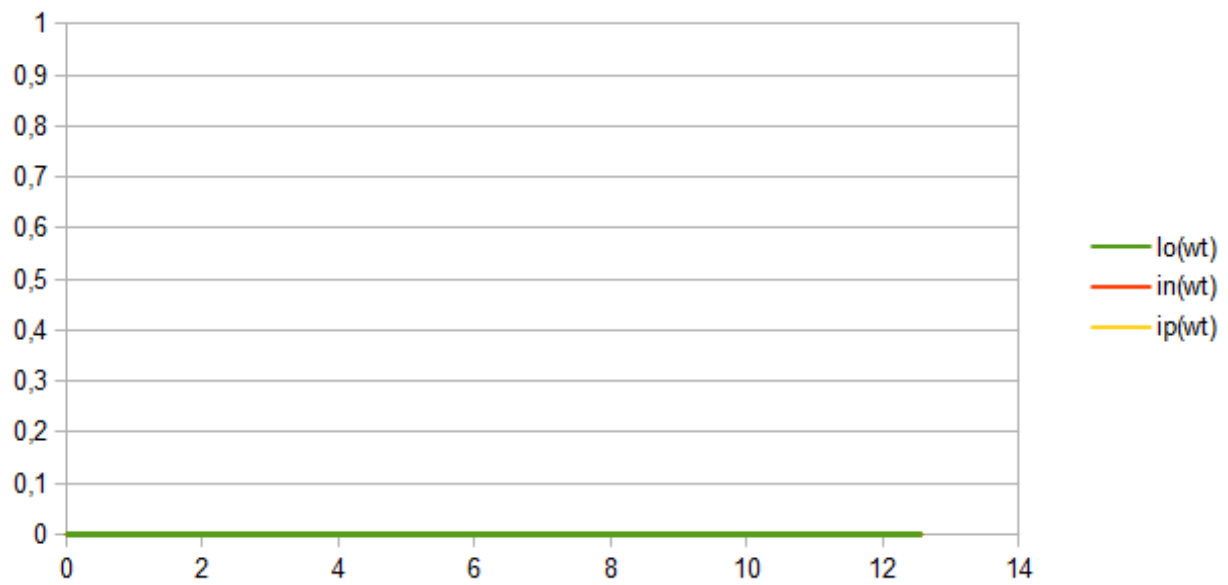


Figura 18: Correntes

3. Socorrendo-se do **PSIM***(3), obtenha as formas de onda para as mesmas grandezas e mesmos ângulos α , de disparo.

a)

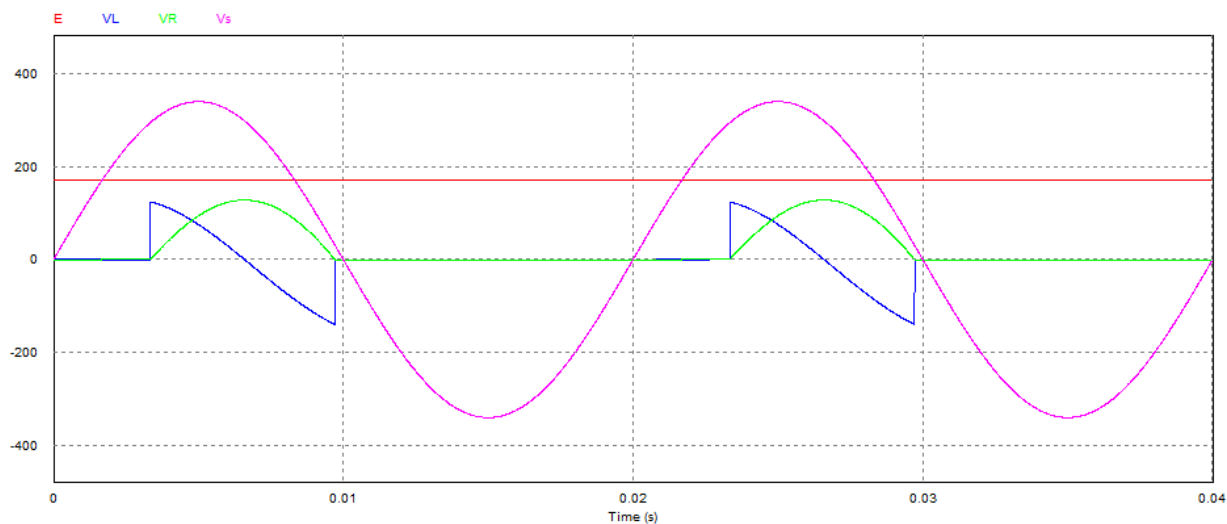


Figura 19: Tensões

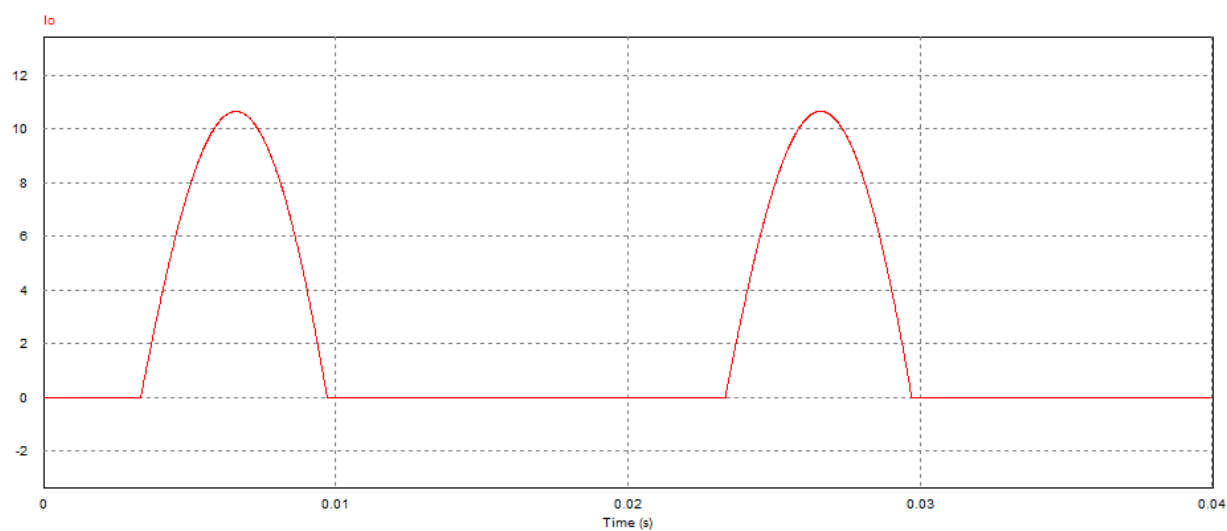


Figura 20: Correntes

b)

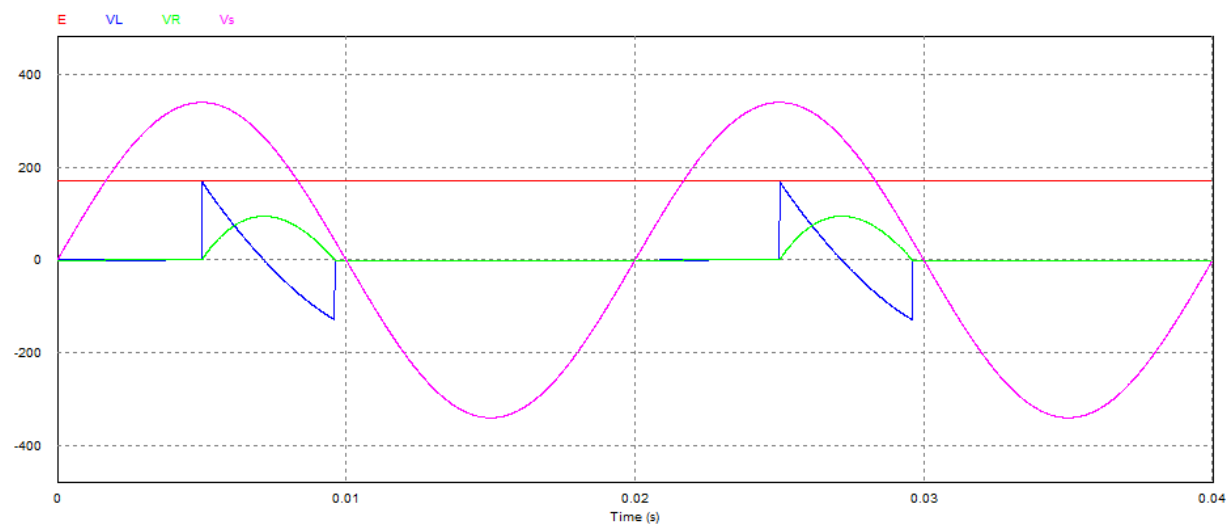


Figura 21: Tensões

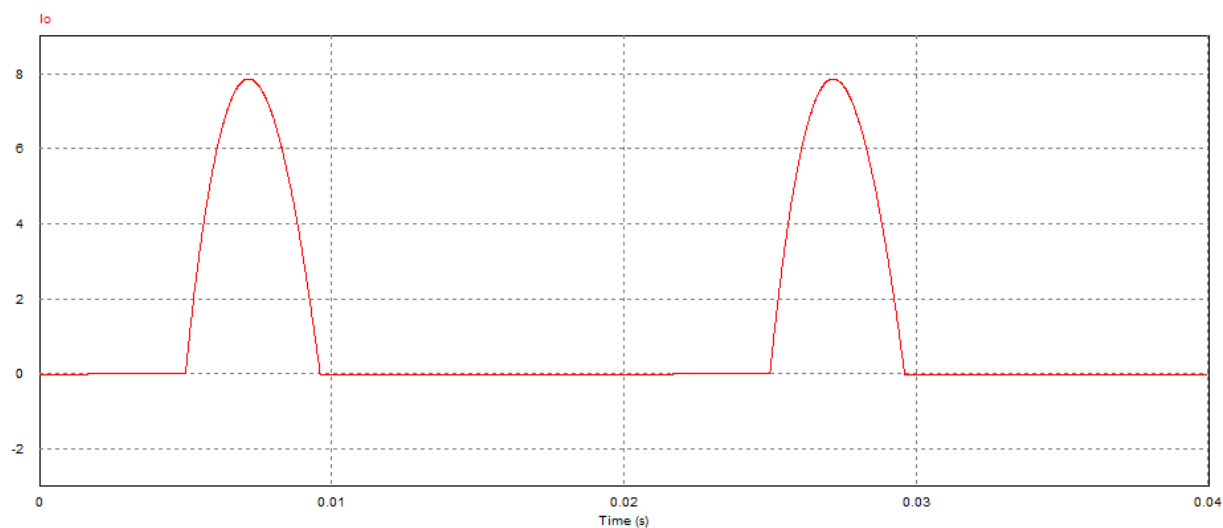


Figura 22: Correntes

c)

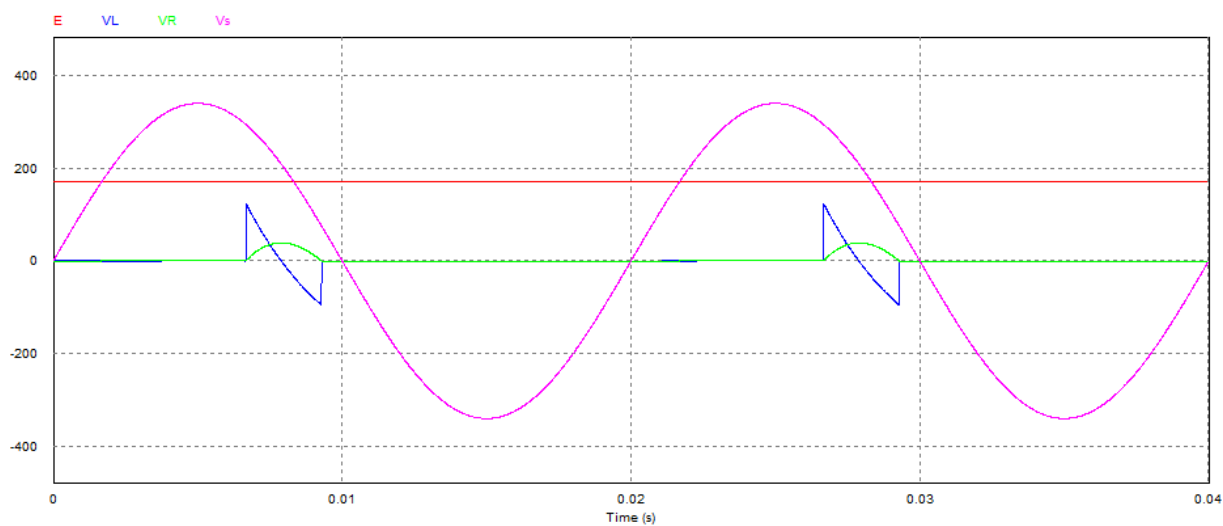


Figura 23: Tensões

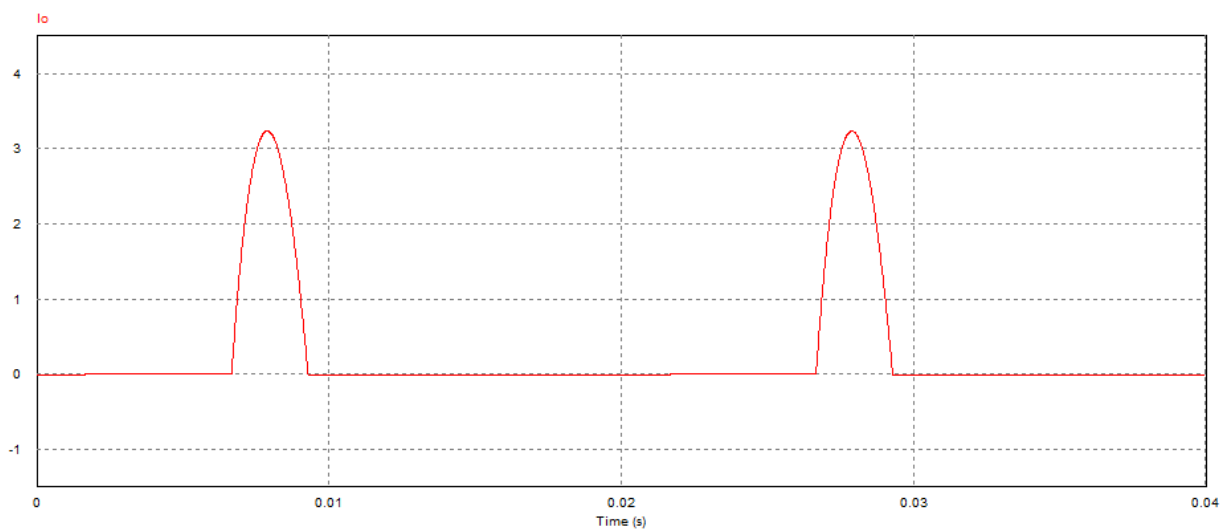


Figura 24: Correntes

d)

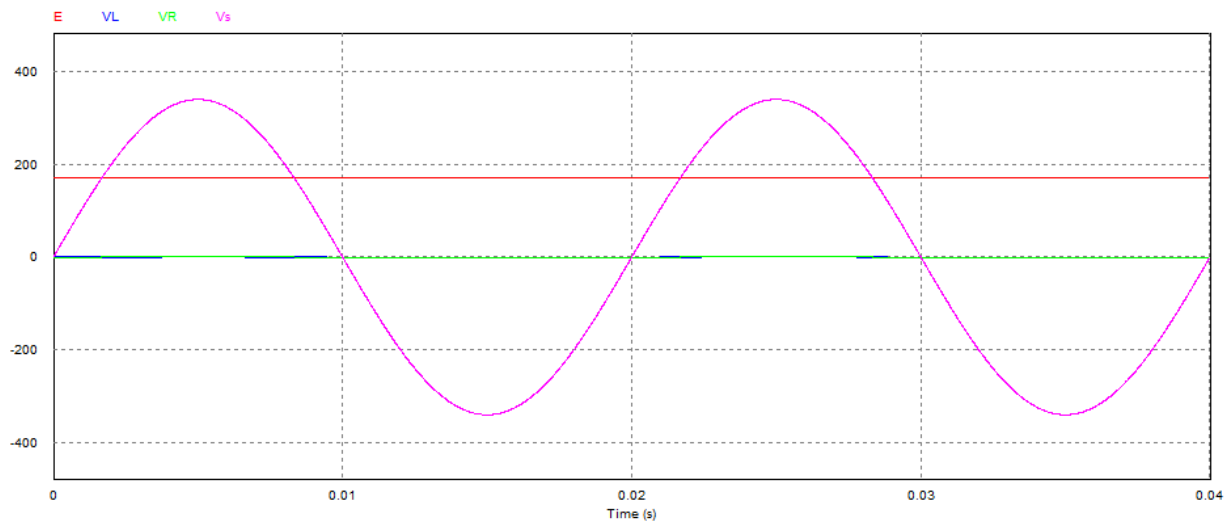


Figura 25: Tensões

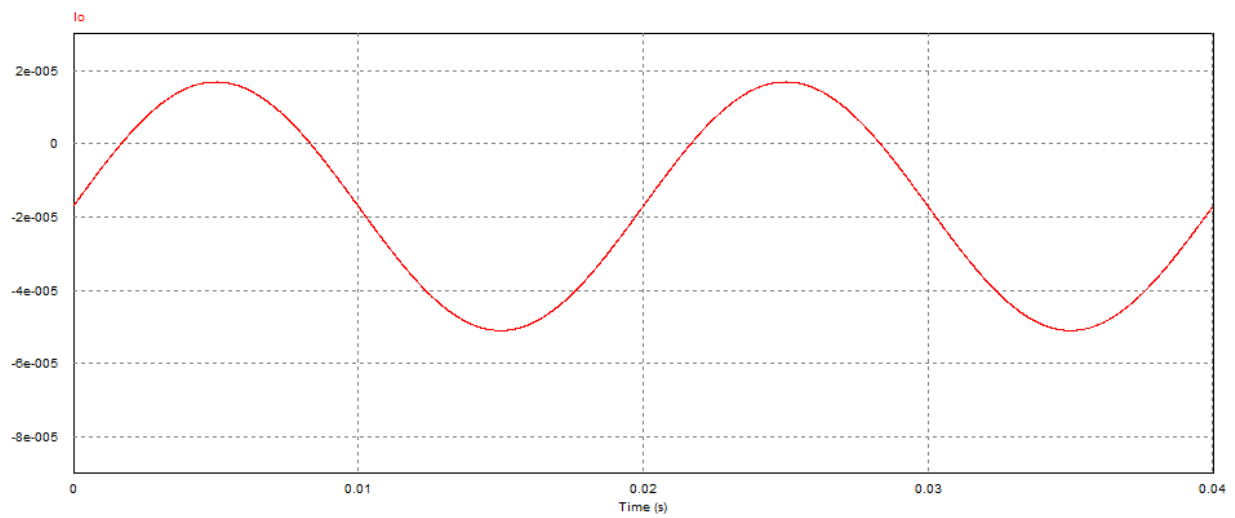


Figura 26: Correntes

- Para efeitos de simulação, utilize para disparo do tiristor o elemento Gating Block, em que o impulso de disparo tem a duração de 1° . (Quanto vale 1° em termos de tempo ?)

Resumo

Nesta Parte II através do **libreOffice** foi representado as formas de onda para diversos disparos do tiristor, os resultados pela folha de calculo so próximos dos adquiridos pelo simulador **PSIM**. O tiristor tem que respeitar certos requisitos para funcionar, tal como a corrente tem que ser positiva de Ânodo a Catodo, e os disparos tem que ocorrer quando a condição inicial apresentar uma corrente positiva imediatamente após o disparo. No **PSIM** a largura dos disparos podem ser definidos ao nosso crer.

Parte III

Equações

Corrente Contínua Condições iniciais nulas .

Circuito LC em $C.C$:

- $i(t) = \frac{V_{DC}\sqrt{LC}}{L} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \times u(t)$
- $V_L(t) = V_{DC} \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \times u(t)$
- $V_C(t) = V_{DC} \left(1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)\right) \times u(t)$
- $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- $\bar{Z} = \sqrt{\left(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}\right)^2}$
- $\phi_p = \frac{\pi}{2}$
porque, $\sin(\omega_n t) = \cos(\omega_n t - \pi/2)$
- $\tau = \infty$

Circuito RLC em $C.C$:

1. Para $C(CR^2 - 4L) > 0$ (Raízes reais diferentes) Sobreamortecido .

- $i(t) = \frac{2V_{DC}Ce^{-\frac{tR}{2L}} \sinh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{\sqrt{C(CR^2-4L)}} \times u(t)$
- $V_R(t) = R \times i(t)$
- $V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

$$L \left(\frac{V_{DC} e^{-\frac{tR}{2L}} \cosh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L} - \frac{V_{DC} C R e^{-\frac{tR}{2L}} \sinh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L\sqrt{C(CR^2-4L)}} \right)$$

- $V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$

$$\frac{2 V_{DC} \left(\frac{\sqrt{C^2 R^2 - 4 C L}}{2} - \frac{\left(\sqrt{C^2 R^2 - 4 C L} \left(e^{\frac{t\sqrt{C^2 R^2 - 4 C L}}{C L}} + 1 \right) + C R e^{\frac{t\sqrt{C^2 R^2 - 4 C L}}{C L}} - C R \right) e^{-\frac{t\sqrt{C^2 R^2 - 4 C L}}{2 C L}}}{4} - \frac{t R}{2 L} \right)}{\sqrt{C(CR^2-4L)}}$$

2. Para $C(CR^2 - 4L) = 0$ (Raízes iguais) Amortecimento crítico .

- $i(t) = \frac{V_{DC}}{L} t e^{-\frac{Rt}{2L}} \times u(t)$
- $V_R(t) = R \times i(t)$
- $V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

$$L \left(\frac{V_{DC} e^{-\frac{tR}{2L}}}{L} - \frac{t V_{DC} R e^{-\frac{tR}{2L}}}{2 L^2} \right)$$

- $V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$

$$\frac{V_{DC} \left(\frac{4 L^2}{R^2} - \frac{(2 t L R + 4 L^2) e^{-\frac{tR}{2L}}}{R^2} \right)}{C L}$$

3. Para $C(CR^2 - 4L) < 0$ (Raízes complexas) Amortecido .

$$\bullet i(t) = \frac{2V_{DC}Ce^{-\frac{tR}{2L}} \sin\left(\frac{t\sqrt{-C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{\sqrt{-C(CR^2-4L)}} \times u(t)$$

$$\bullet V_R(t) = R \times i(t)$$

$$\bullet V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$L \left(\frac{V_{DC} e^{-\frac{tR}{2L}} \cos\left(\frac{t\sqrt{-C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L} - \frac{V_{DC} C R e^{-\frac{tR}{2L}} \sin\left(\frac{t\sqrt{-C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L\sqrt{-C(CR^2-4L)}} \right)$$

$$\bullet V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

$$\frac{2V_{DC}}{\sqrt{-C(CR^2-4L)}} \left(\frac{\sqrt{4CL-C^2R^2}}{2} e^{-\frac{tR}{2L}} \left(C R \sin\left(\frac{t\sqrt{4CL-C^2R^2}}{2CL}\right) + \sqrt{4CL-C^2R^2} \cos\left(\frac{t\sqrt{4CL-C^2R^2}}{2CL}\right) \right) \right)$$

$$\bullet |\omega_n| = \sqrt{\frac{4L-R^2C}{4L^2C}}$$

$$\bullet \bar{Z} = \sqrt{R^2 + (\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C})^2}$$

$$\bullet \phi_p = \arctan\left(\frac{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}}{R}\right)$$

$$\bullet \tau = \frac{2L}{R}$$

Corrente Alternada condições iniciais nulas .

Circuito RLE em C.A:

$$\bullet i(t) = C_T e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_{m\acute{a}x}}{\bar{Z}} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{E}{R}$$

$$i(t) = C_T e^{-\frac{R}{L}t} + C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) - \frac{E}{R}$$

$$\bullet I(\omega t) = C_T e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t} + \frac{V_{m\acute{a}x}}{\bar{Z}} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{E}{R}$$

$$\bullet \vec{Z} = R + j\omega L$$

$$\bar{Z} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\bullet \phi_p = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$\bullet C_T = \frac{E}{R} - \frac{V_{m\acute{a}x}}{\bar{Z}} \sin(\alpha - \phi_p)$$

$$\bullet C_T = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R^2 + (\omega L)^2} (L\omega \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)) + \frac{E}{R}$$

$$\bullet C_1 = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R^2 + (\omega L)^2} (R \sin(\alpha) - L\omega \cos(\alpha))$$

$$\bullet C_2 = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R^2 + (\omega L)^2} (R \cos(\alpha) + L\omega \sin(\alpha))$$

Definição 1 *Capacitância*

$$\begin{aligned}
Q_c(t) &= \int^t i(t) \, dt \\
&= Q_c(0^-) + \int_{0^-}^t i(t) \, dt \\
V_c(t) &= \frac{Q_c(t)}{C} \\
&= \frac{1}{C} \int^t i_c(t) \, dt \\
&= \frac{Q_c(0^-)}{C} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) \, dt \\
&= V(0^-) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) \, dt \\
i_c(t) &= C \frac{dV_c(t)}{dt}
\end{aligned}$$

Definição 2 *Indutância*

$$\begin{aligned}
\psi_L(t) &= \int^t V_L(t) \, dt \\
&= \psi_L(0^-) + \int_{0^-}^t V_L(t) \, dt \\
V_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} \\
i_L(t) &= \frac{\psi_L(t)}{L} \\
&= \frac{1}{L} \int^t V_L(t) \, dt \\
&= \frac{\psi_L(0^-)}{L} + \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t) \, dt \\
&= i_L(0^-) + \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t) \, dt
\end{aligned}$$

Definição 3 *Resistência*

$$\begin{aligned}
V_R(t) &= R \, i_R(t) \\
i_R(t) &= \frac{V_R(t)}{R}
\end{aligned}$$

Definição 4 *Valor Médio*

$$X_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$$

Definição 5 *Valor Eficaz*

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt}$$

Lista de Figuras

1	Circuito <i>RLE</i> comutado	3
2	Tensões	4
3	Correntes	5
4	Tensões	6
5	Correntes	6
6	Tensões	2
7	Corrente	2
8	Tensões	3
9	Corrente	3
10	Circuito <i>RLE</i> tiristorizado	3
11	Tensões	4
12	Correntes	4
13	Tensões	5
14	Correntes	5
15	Tensões	6
16	Correntes	6
17	Tensões	7
18	Correntes	7
19	Tensões	8
20	Correntes	8
21	Tensões	8
22	Correntes	9
23	Tensões	9
24	Correntes	9
25	Tensões	10
26	Correntes	10
□		

Bibliografia

- [1] *Curso de Introduo ao LATEX*.
- [2] *Electrónica Analógica*. McGraw Hill, 1993.
- [3] *Cálculo Diferencial e Integral em \mathbb{R} e \mathbb{R}^n* . McGraw Hill, 1995.
- [4] *Power Electronic Converter Harmonics*. IEEE Press Editorial Board, 1996.
- [5] *Cálculo Diferencial e Integral*. Lopes da Silva Editora, 1997.
- [6] *electromagnetismo*. McGraw Hill, 1999.
- [7] *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Newnes Power Engineering Series, 2002.
- [8] *The Maxima Book*. , 2004.
- [9] *HIGHER ENGINEERING MATHEMATICS*. Published by Elsevier Ltd, 2006.
- [10] *PSIM Users Guide*. Powersim Inc., 2009.
- [11] *Analog and Digital Control System Design: Transfer-Function, State-Space, and Algebraic Methods*. Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, .
- [12] *Teach Yourself Electricity and Electronics*. McGraw-Hill, .
- [13] Fidalgo, André: *Sistemas Eléctricos de Corrente Alternada*. Em *Unidade de Ensino 2*.
- [14] Fidalgo, André: *Sistemas Eléctricos de Corrente Contínua*. Em *Unidade de Ensino 1*.

