



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

Relatório - Simulação 2 Retificadores controlados

Nome:

Daniel Dello Russo Oliveira

Marcelli Tiemi Kian

RA

101918

117892

23 de setembro de 2016

0.1 Objetivos

Essa simulação tem como objetivo o estudo de retificadores controlados. Analisaremos o efeito do ângulo de disparo e de cargas indutivas e capacitivas na saída de um retificador monofásico controlado.

0.2 Carga R

Através do Simulink implementamos o retificador monofásico totalmente controlado detalhado em [FUJIWARA, 2016] conforme mostrado na figura 1.

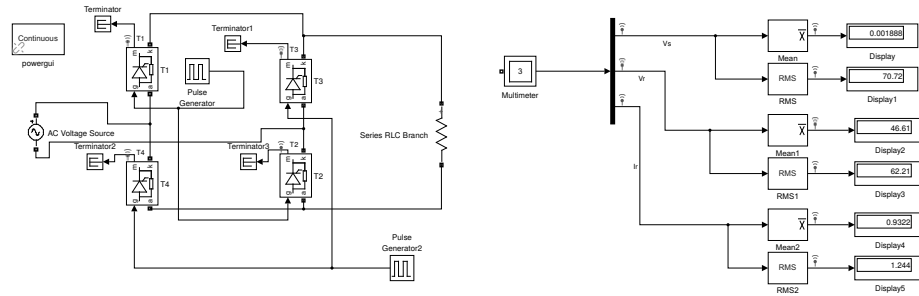


Figura 1: Esquema para simulação do retificador monofásico controlado com carga R

Extraímos dessa simulação as curvas de tensão na fonte (figura 2), tensão na carga (figura 3) e corrente na carga (figura 4) para dois períodos da fonte e com um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$.

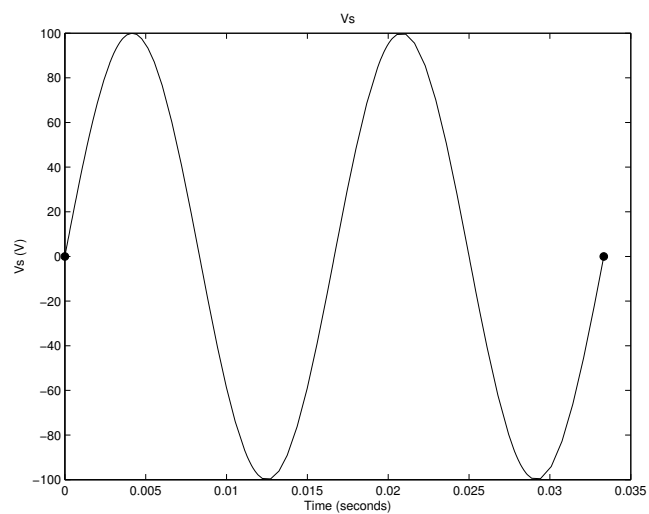


Figura 2: Tensão da fonte para retificador monofásico com carga R

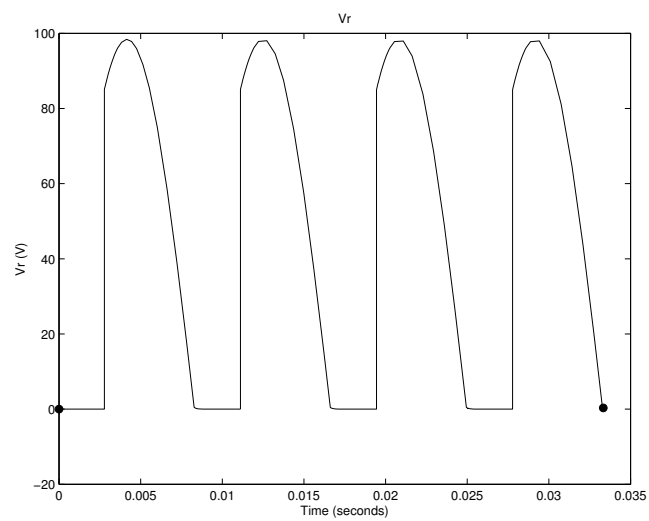


Figura 3: Tensão na carga para retificador monofásico com carga R

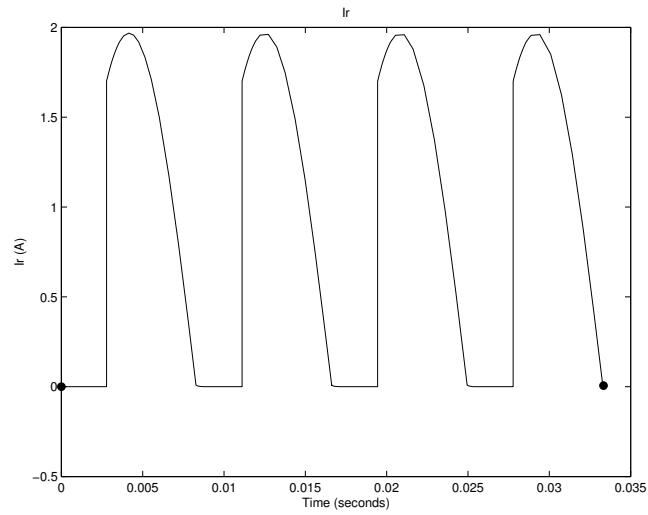


Figura 4: Corrente na carga para retificador monofásico com carga R

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na carga, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 46.6080 \text{ V} \quad (1)$$

$$\overline{I_r} = 0.9322 \text{ A} \quad (2)$$

$$V_{r_{rms}} = 62.2060 \text{ V} \quad (3)$$

$$I_{r_{rms}} = 1.2441 \text{ A} \quad (4)$$

Obtivemos também as curvas de tensão e corrente para cada tiristor do arranjo, representadas nas figuras 5, 6, 7 e 8

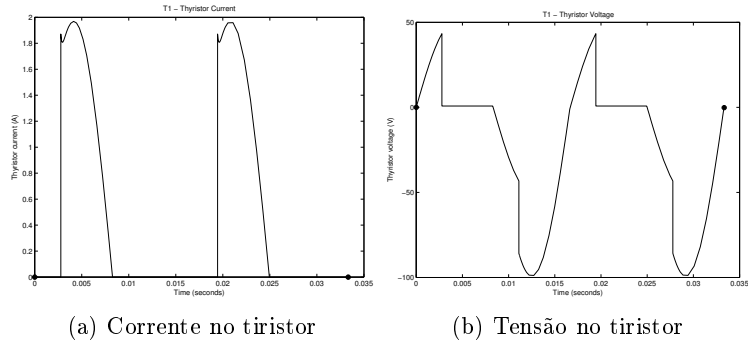


Figura 5: Curvas do tiristor 1 para retificador monofásico com carga R

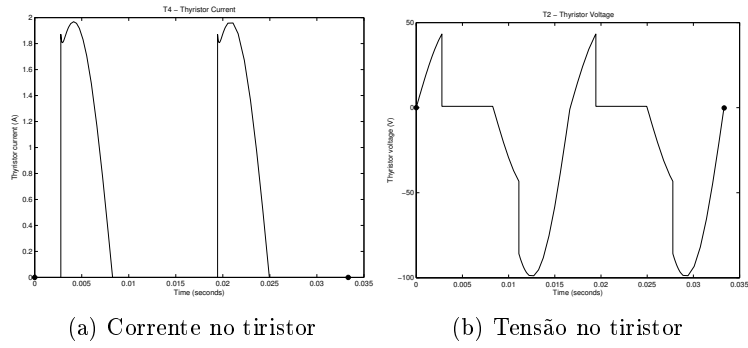


Figura 6: Curvas do tiristor 2 para retificador monofásico com carga R

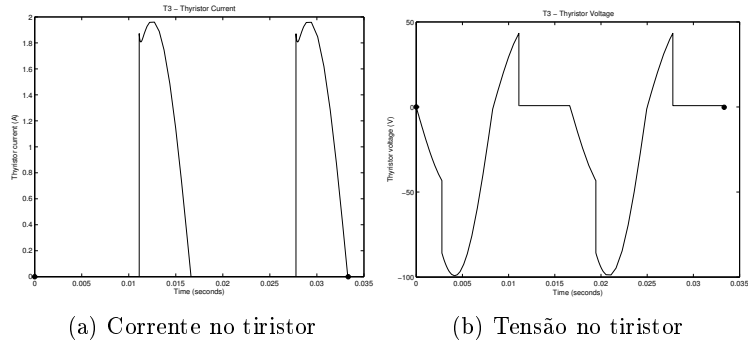


Figura 7: Curvas do tiristor 3 para retificador monofásico com carga R

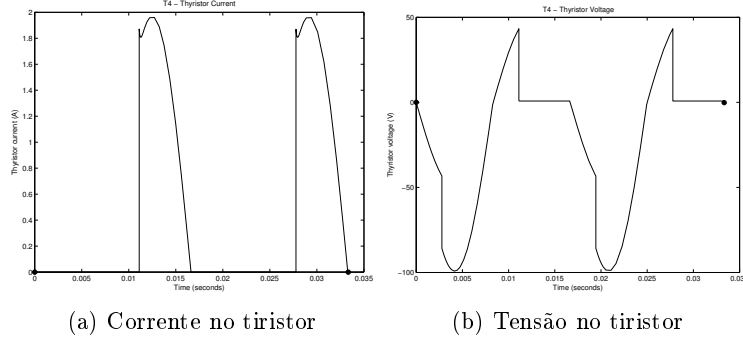


Figura 8: Curvas do tiristor 4 para retificador monofásico com carga R

Conforme podemos ver analisando as curvas dos diodos (figuras 5, 6, 7 e 8) e a tensão da fonte (figura 2), para uma carga puramente resistiva, durante o semi-ciclo positivo da fonte, os tiristores 1 e 2 conduzem se o ângulo de disparo α já foi atingido enquanto 3 e 4 estão bloqueando, dessa forma a tensão sobre a carga é V_s . Já no semi-ciclo negativo da fonte, os tiristores 3 e 4 conduzem se o ângulo de disparo $\alpha + 180^\circ$ já foi atingido enquanto 1 e 2 estão bloqueando, fazendo que a tensão na carga seja de $-V_s$. Dessa forma conseguimos transformar uma tensão senoidal sobre a carga em uma tensão sempre positiva, de maneira que seu valor médio não seja nulo.

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 5

$$\overline{Vr} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{V_s(1 + \cos(\alpha))}{\pi} \quad (5)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 6.

$$Vr_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_s \sqrt{\pi + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \alpha}}{\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

Varrendo o ângulo de disparo α entre 0° e 180° comparamos os valores teóricos e medidos para a tensão (figura 9) e corrente (figura 10) sobre a carga

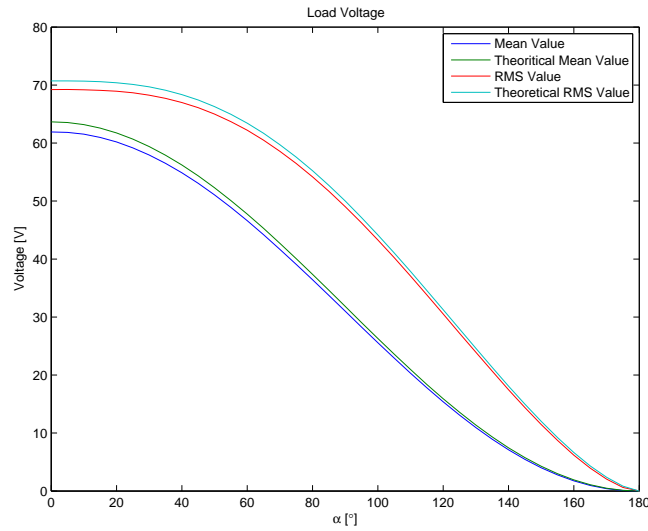


Figura 9: Tensão na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

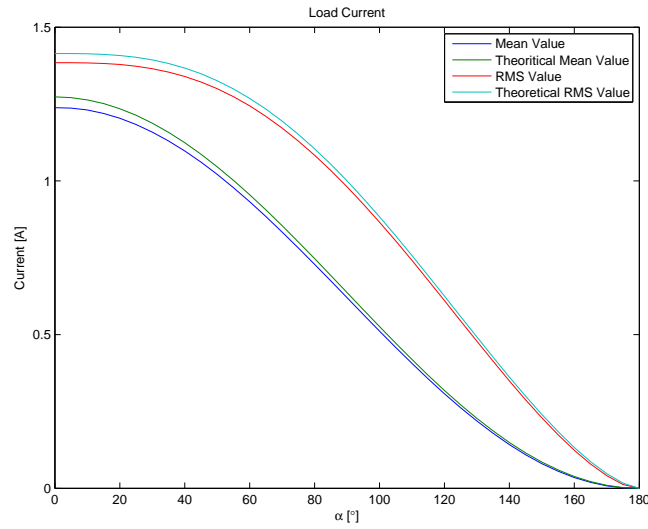


Figura 10: Corrente na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

Como podemos ver os valores obtidos são um pouco menores dos que os esperados teoricamente, isso se deve às imprecisões numéricas da simulação, à queda de tensão introduzida pelos diodos, ao pequeno período de amostragem, entre outros fatores.

Calculamos o fator de retificação para um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$

usando a equação 7.

$$\sigma = \frac{\overline{P}}{P_{rms}} = \frac{\overline{V_r^2}}{V_{rms}^2} \quad (7)$$

$$\sigma = 0.5614 \quad (8)$$

Encontramos por fim o fator de forma para um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ usando a equação 9.

$$FF = \frac{\overline{V_r}}{V_{rms}} \quad (9)$$

$$FF = 1.3347 \quad (10)$$

0.3 Carga RL

Conectamos então um indutor em série com o resistor conforme mostrado na figura 11.

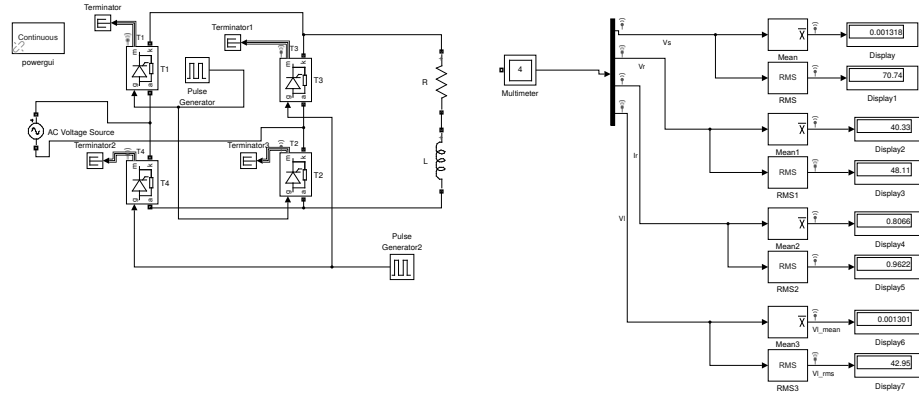


Figura 11: Esquema para simulação do retificador monofásico controlado com carga RL

Simulamos o circuito para uma indutância $L = 100mH$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 12) e corrente (figura 13) no resistor e de tensão no indutor (figura 14) para dois períodos da fonte.

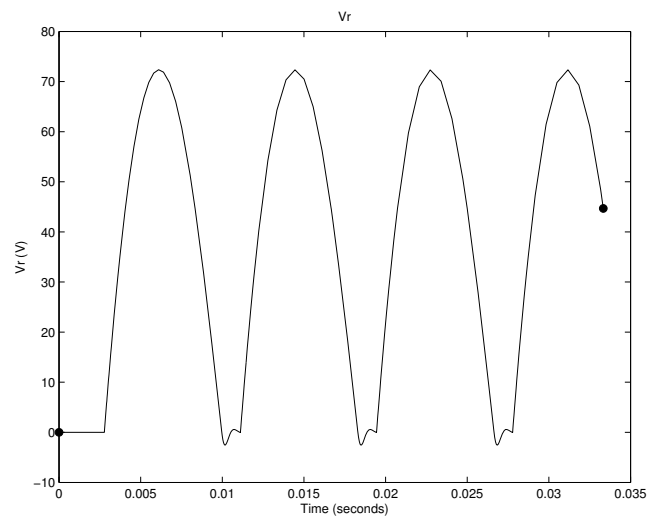


Figura 12: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

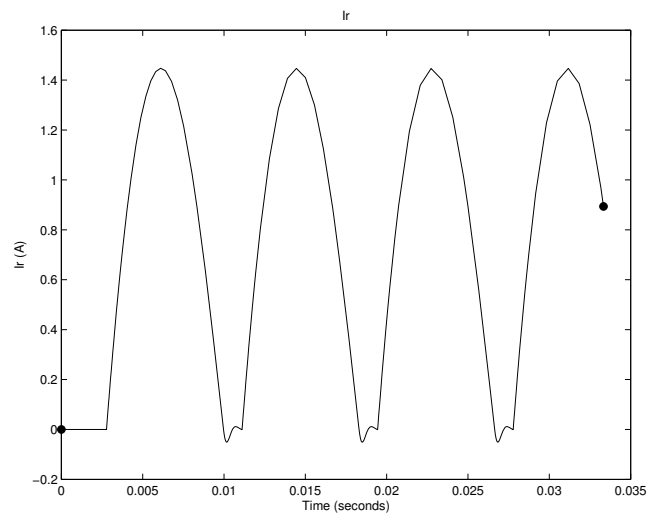


Figura 13: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

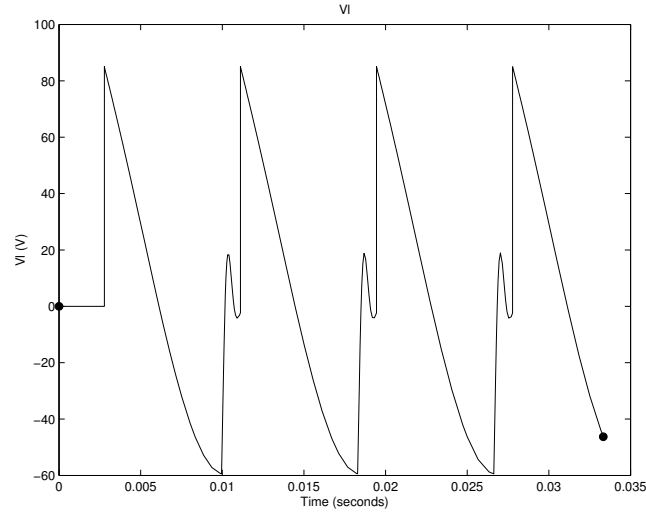


Figura 14: Tensão no indutor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 40.3318 \text{ V} \quad (11)$$

$$\overline{I_r} = 0.8066 \text{ A} \quad (12)$$

$$V_{rms} = 48.1121 \text{ V} \quad (13)$$

$$I_{rms} = 0.9622 \text{ A} \quad (14)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 7.

$$\sigma = 0.7027 \quad (15)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 9.

$$FF = 1.1929 \quad (16)$$

Simulamos então circuito com uma indutância $L = 1H$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 15) e

corrente (figura 16) no resistor e de tensão no indutor (figura 17) para quinze períodos da fonte.

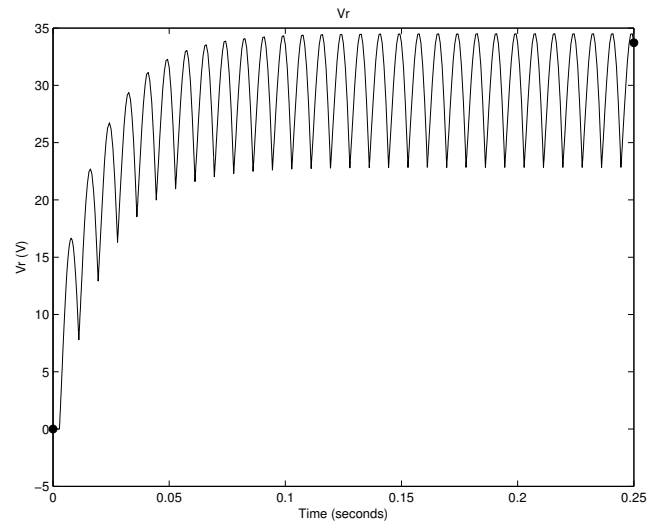


Figura 15: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RL (1H)

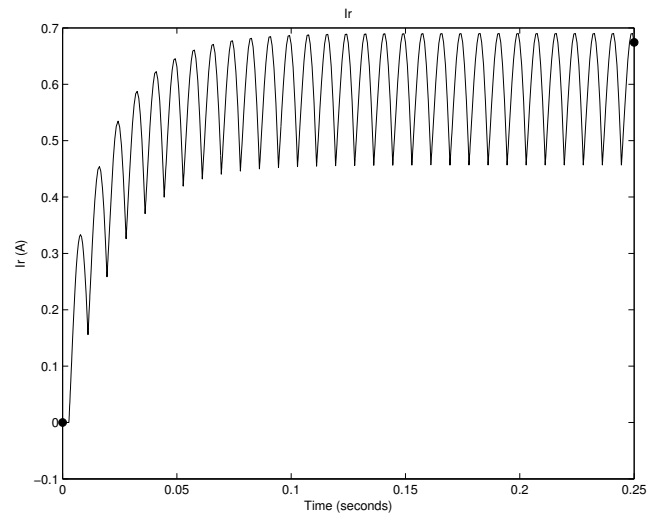


Figura 16: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RL (1H)

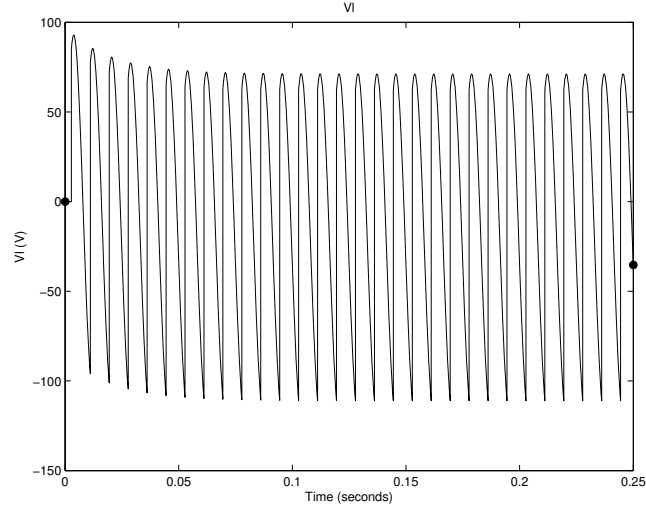


Figura 17: Tensão no indutor para retificador monofásico com carga RL (1H)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 30.1911 \text{ V} \quad (17)$$

$$\overline{Ir} = 0.6038 \text{ A} \quad (18)$$

$$Vr_{rms} = 30.4340 \text{ V} \quad (19)$$

$$Ir_{rms} = 0.6087 \text{ A} \quad (20)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 7.

$$\sigma = 0.9841 \quad (21)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 9.

$$FF = 1.0080 \quad (22)$$

Podemos ver que ao introduzir uma carga indutiva os tiristores continuam conduzindo mesmo que a tensão sobre eles seja negativa (contanto que a corrente continue positiva). Isso causa uma redução da tensão média na carga. Ao mesmo

tempo, o indutor, uma vez carregado evita variações bruscas na corrente sobre a carga (possivelmente evitando que ela chegue a zero), aumentando o alisamento (e conseqüentemente melhorando o fator de forma e o de retificação) de maneira proporcional ao valor da indutância.

Para os dois valores de indutância nós medimos uma tensão média praticamente nula no indutor. Esse resultado é esperado uma vez que:

$$\overline{Vl} = \frac{1}{T} \int_0^T Vl dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{LdI}{dt} dt = \frac{LI}{T} \Big|_0^T \quad (23)$$

Como nossa resposta é periódica, sabemos que $I(0) = I(T)$ logo:

$$\overline{Vl} = 0 \quad (24)$$

0.4 Carga RC

Conectamos então um capacitor em paralelo com o resistor conforme mostrado na figura 18.

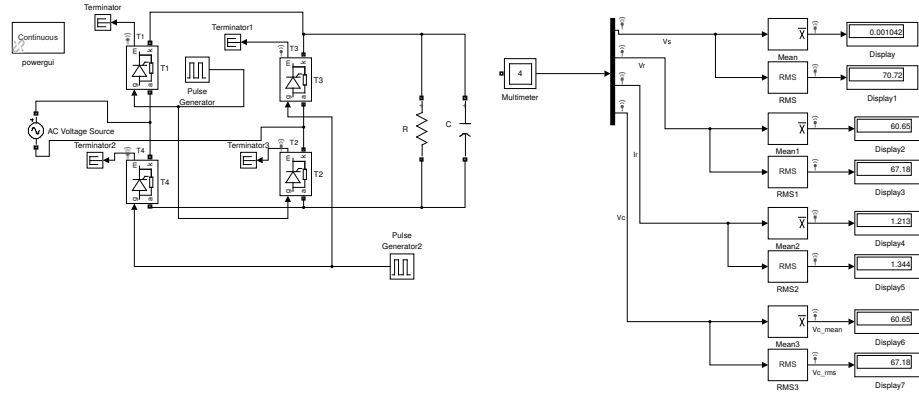


Figura 18: Esquema para simulação do retificador monofásico controlado com carga RC

Simulamos o circuito para uma capacitância $C = 100\mu F$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 19) e corrente (figura 20) no resistor para dois períodos da fonte.

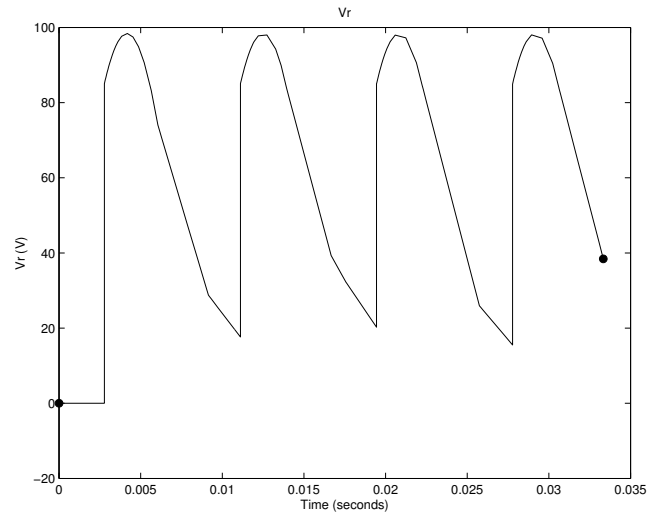


Figura 19: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RC ($100\mu F$)

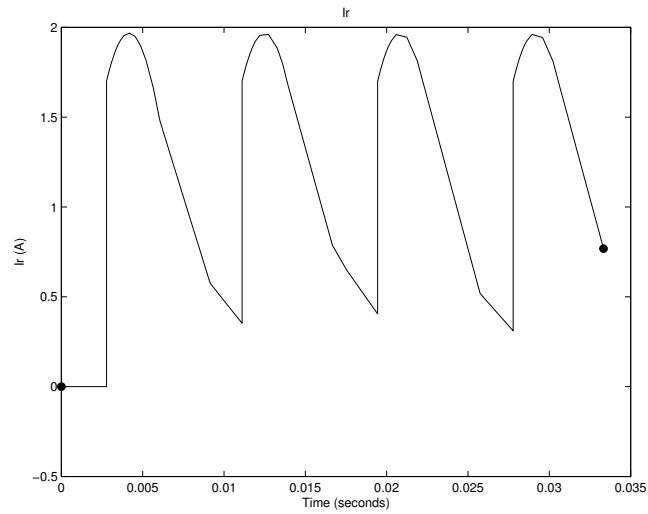


Figura 20: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RC ($100\mu F$)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 60.6456 \text{ V} \quad (25)$$

$$\overline{I_r} = 1.2129 \text{ A} \quad (26)$$

$$V_{r_{rms}} = 67.1804 \text{ V} \quad (27)$$

$$I_{r_{rms}} = 1.3436 \text{ A} \quad (28)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 7.

$$\sigma = 0.8149 \quad (29)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 9.

$$FF = 1.1078 \quad (30)$$

Simulamos então circuito com uma capacitância $C = 1mF$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 21) e corrente (figura 22) no resistor para dois períodos da fonte.

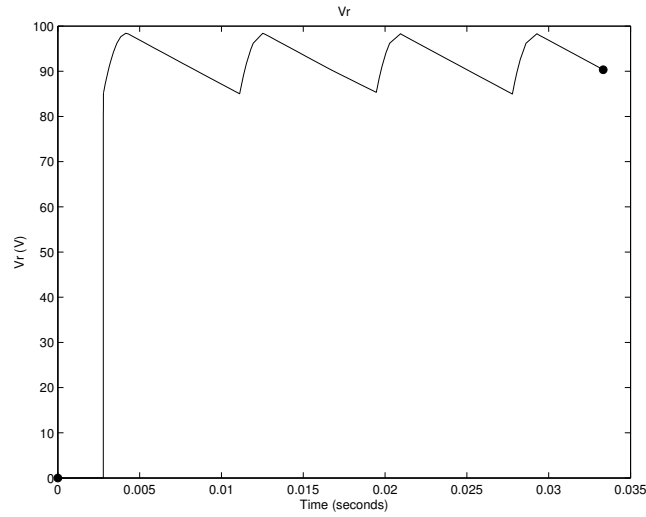


Figura 21: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RC ($1mF$)

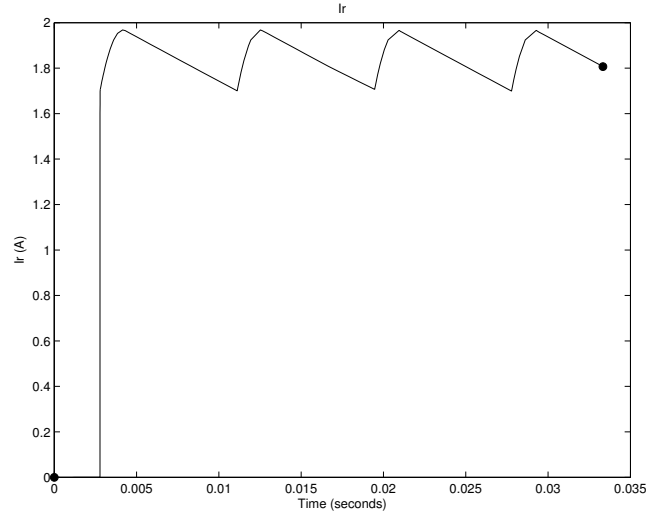


Figura 22: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RC ($1mF$)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 92.0838 \text{ V} \quad (31)$$

$$\overline{Ir} = 1.8417 \text{ A} \quad (32)$$

$$Vr_{rms} = 92.1690 \text{ V} \quad (33)$$

$$Ir_{rms} = 1.8434 \text{ A} \quad (34)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 7.

$$\sigma = 0.9982 \quad (35)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 9.

$$FF = 1.0009 \quad (36)$$

Ao introduzir uma carga capacitiva esta armazenará energia, liberando-a quando a tensão sobre o resistor diminuí. Essa energia liberada causa uma retificação da tensão sobre o resistor, de maneira proporcional à capacitância,

obtendo uma curva de tensão quase linear com ótimos fatores de forma e de retificação.

Referências Bibliográficas

[FUJIWARA, 2016] FUJIWARA, E. **Retificadores controlados**. Roteiro Simulação 2, Unicamp/FEM/DSI, 2016.