



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

---

## ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

### Relatório - Experimento 2 Retificadores controlados

---

*Nome:*

Daniel Dello Russo Oliveira  
Marcelli Tiemi Kian

*RA*

101918  
117892

7 de outubro de 2016

# 1 Objetivos

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

## 2 Carga R

Implementamos o retificador monofásico totalmente controlado detalhado no roteiro conforme mostrado na figura 1 com uma lâmpada de resistência  $R = 9.42\Omega$ .

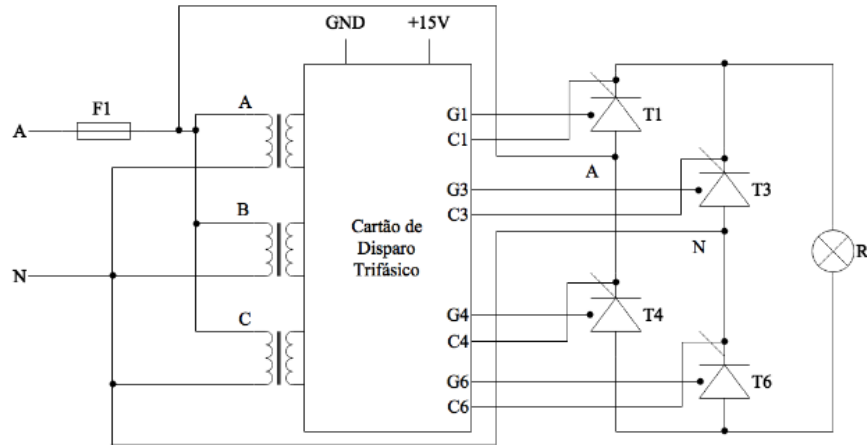


Figura 1: Diagrama para montagem do retificador monofásico de onda completa totalmente controlado

Extraímos a curva de tensão na carga (figura 2) e a tensão nos tiristores 3 (figura 3) e 6 (figura 4) para um ângulo de disparo  $\alpha = 60^\circ$ .

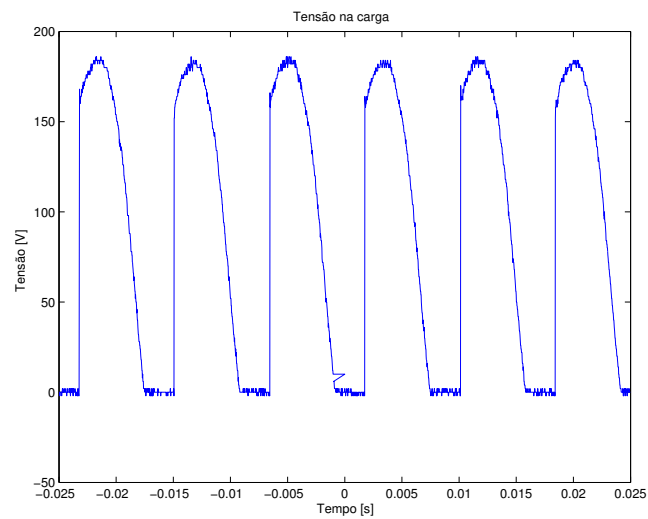


Figura 2: Tensão na carga para retificador monofásico com carga R

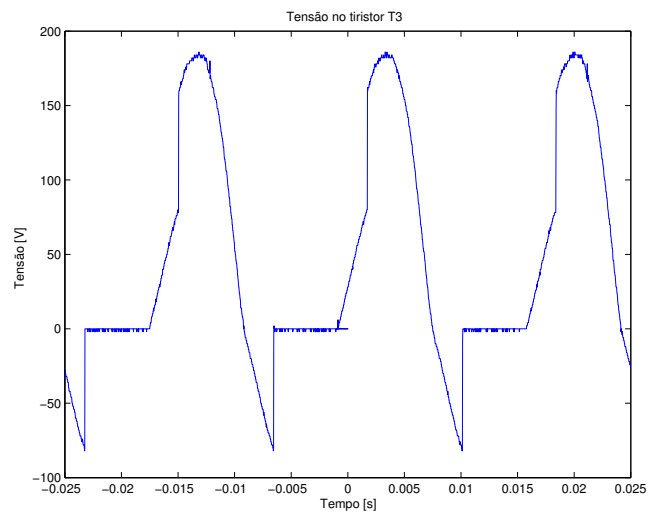


Figura 3: Tensão no tiristor 3 para retificador monofásico com carga R

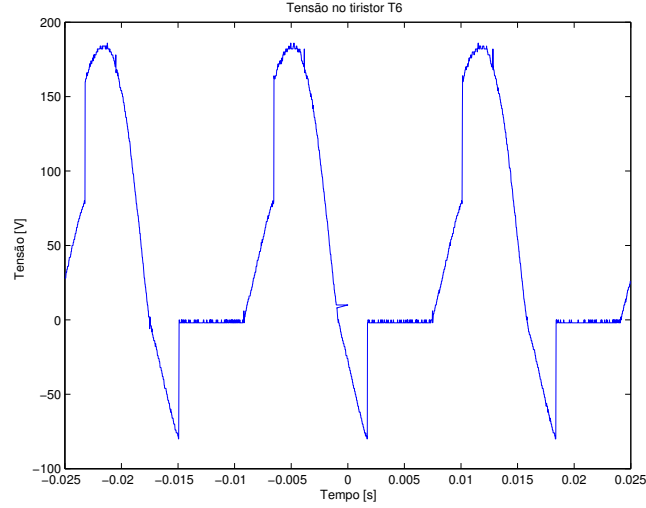


Figura 4: Tensão no tiristor 6 para retificador monofásico com carga R

Medimos a tensão média e efetiva na carga, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_o} = 93.7 \text{ V} \quad (1)$$

$$V_{o_{rms}} = 121 \text{ V} \quad (2)$$

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 3

$$\overline{V_r} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{V_s(1 + \cos(\alpha))}{\pi} \quad (3)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 4.

$$V_{r_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_s \sqrt{\pi + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \alpha}}{\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

Varrendo o ângulo de disparo  $\alpha$  entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  comparamos os valores teóricos e medidos para a tensão sobre a carga, figura 5.

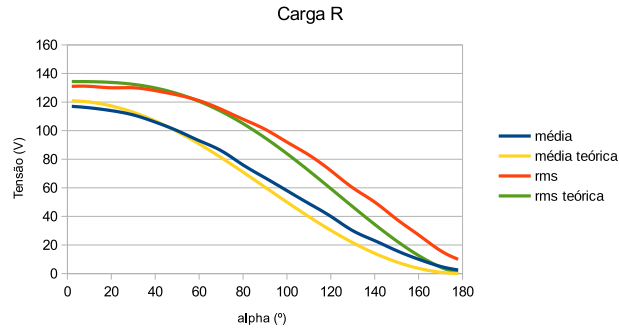


Figura 5: Tensão na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

Como podemos ver os valores obtidos diferem pouco dos que os esperados teoricamente, as pequenas variações se devem às imprecisões de medida, à queda de tensão introduzida pelos diodos, aos componentes não ideais, entre outros fatores.

### 3 Carga RL

Conectamos então um indutor ( $L = 43.9 \text{ mH}$ ) em série com o resistor mostrado na figura 1. Extraímos as curvas de tensão no resistor (figura 6) no indutor (figura 7) e na carga RL como um todo (figura 8) para um ângulo de disparo  $\alpha = 60^\circ$ .

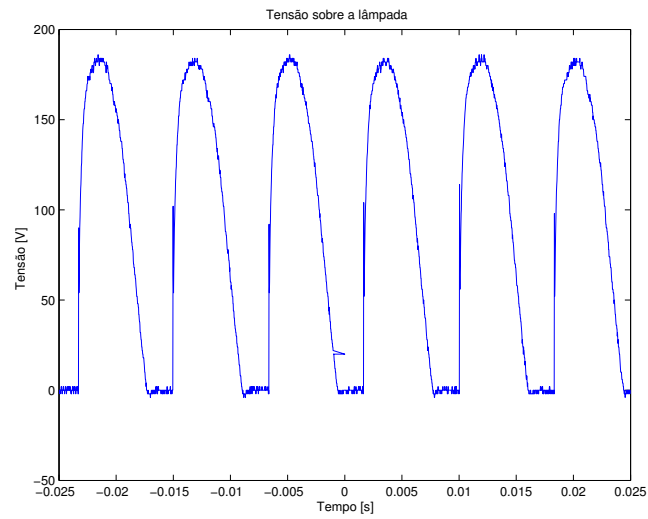


Figura 6: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RL

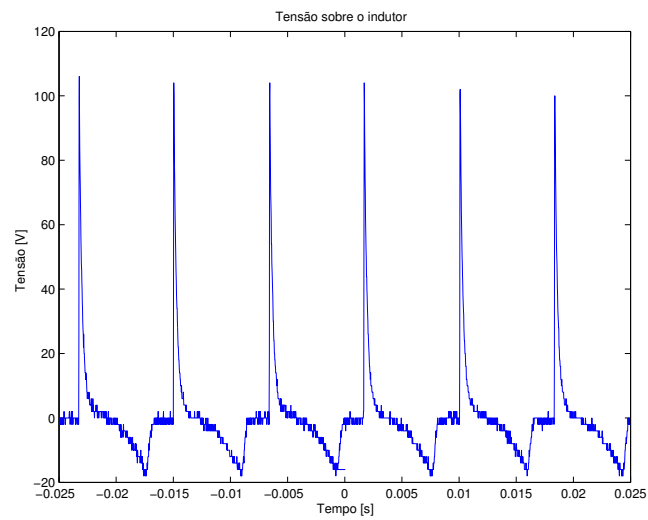


Figura 7: Tensão no indutor para retificador monofásico com carga RL

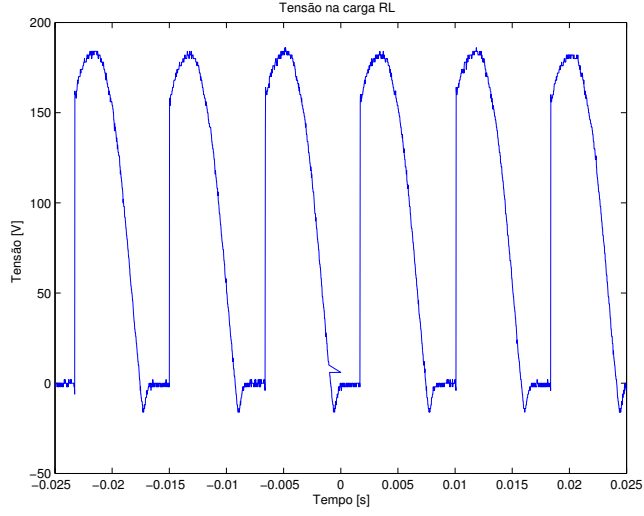


Figura 8: Tensão na carga para retificador monofásico com carga RL

Medimos as tensões médias e efetivas na resistência R, no indutor L e na carga como um todo, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 92 \text{ V} \quad (5)$$

$$V_{r_{rms}} = 118 \text{ V} \quad (6)$$

$$\overline{V_l} = 0.04 \text{ V} \quad (7)$$

$$V_{l_{rms}} = 15 \text{ V} \quad (8)$$

$$\overline{V_{rl}} = 93.7 \text{ V} \quad (9)$$

$$V_{rl_{rms}} = 121 \text{ V} \quad (10)$$

Sendo  $\phi$  a defasagem introduzida pela carga indutiva:

$$\phi = \arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right) \quad (11)$$

Sabemos que a corrente sobre a carga será da forma durante o intervalo que existe condução:

$$i(\omega t) = \frac{V_s}{Z}(\sin(\omega t - \phi)) - \sin(\alpha - \phi)e^{\frac{R}{L}(t - \frac{\alpha}{\omega})} \quad (12)$$

Supondo um ângulo de extinção  $\gamma$  teremos:

$$i(\pi + \gamma) = 0 = \frac{V_s}{Z}(\sin(\pi + \gamma - \phi)) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{R}{L}(\frac{\pi + \gamma - \alpha}{\omega})} \quad (13)$$

Logo:

$$0 = \sin(\pi + \gamma - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{\pi + \gamma - \alpha}{\tan(\phi)}} \quad (14)$$

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 15

$$\overline{V_r} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \min(\alpha, \gamma)} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{V_s(-\cos(\pi + \min(\alpha, \gamma)) + \cos(\alpha))}{\pi} \quad (15)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 17.

$$V_{r_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \min(\alpha, \gamma)} (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} \quad (16)$$

$$V_{r_{rms}} = \frac{V_s \sqrt{\pi + \min(\alpha, \gamma) + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \frac{\sin(2(\pi + \min(\alpha, \gamma)))}{2} - \alpha}}{\sqrt{2\pi}} \quad (17)$$

Variamos o ângulo  $\alpha$  entre 0 e 180° e comparamos os valores teóricos e medidos para a tensão sobre a carga, figura 9.

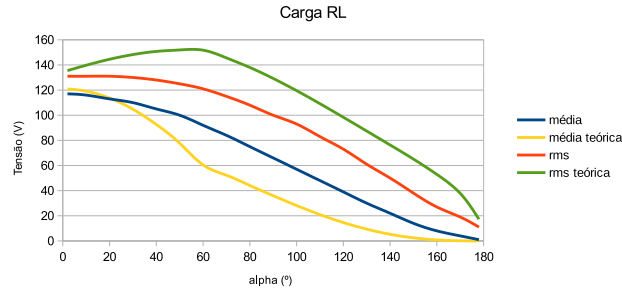


Figura 9: Tensão na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

Como podemos ver os valores medidos e teóricos pouco se assemelham. Acre-



ditamos que um dos principais fatores causadores dessa discrepância foi a medição da resistência da lâmpada (que apresentou um valor muito menor do que o esperado e estava flutuando significativamente entre cada medida). Também precisamos levar em consideração o fato que ignoramos a resistência associada com o indutor (que não é necessariamente desprezível). Ajustamos nossa curva teóricas para uma lâmpada de  $57\Omega$  (valor medido no experimento 1) e obtivemos resultados bem mais próximos (figura 10)

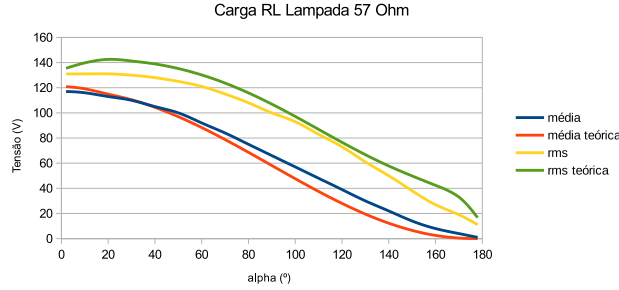


Figura 10: Tensão na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo para lâmpada de  $57\Omega$

Calculamos o ângulo de extinção  $\gamma$  teórico (para cada valor de resistência) para um  $\alpha = 90^\circ$  resolvendo numericamente a equação 14.

$$\gamma_t = 168.15^\circ \quad (18)$$

$$\gamma_{t_{57}} = 50.57^\circ \quad (19)$$

Podemos também estimar esse valor com a tensão média medida e a equação 15.

$$\gamma = 66.12^\circ \quad (20)$$

Como podemos ver esse valor se aproxima muito mais do valor esperado para uma resistência de  $57\Omega$  do que para o valor da resistência medido.

Podemos encontrar o  $\alpha_c$  para que o circuito opere no limiar entre condução contínua e descontínua utilizando a equação 14 com a condição  $\gamma = \alpha_c$ . Encontramos então (para cada valor de resistência):

$$\alpha_{ct} = 60.35^\circ \quad (21)$$

$$\alpha_{ct_{57}} = 16.19^\circ \quad (22)$$

De acordo com a nota de aplicação do AN1048/D da ON Semiconductor [TEMPLETON, 2008], os circuitos "snubber" montado em paralelo com os tiristores como no kit utilizado favorecem o acionamento do tiristor. No caso de subidas íngremes, ele atenua a descontinuidade e diminui a sensibilidade do disparo ao degrau, pois o capacitor absorve parte desta variação brusca.

Também possui outra funcionalidade, facilitando o disparo de sistemas com carga indutiva. Neste segundo caso, o capacitor se descarrega com o disparo. Entretanto, existe a recomendação de não utilizar uma carga capacitiva muito alta, pois acaba interferindo no circuito durante o disparo (oscilações provenientes do descarregamento do capacitor ficam significativas).

O circuito de disparo, baseado no circuito integrado TCA785, tem seu funcionamento detalhado em [SIEMENS, 2005]. Dada uma tensão de linha de referência, um detector de tensão nula encontra as passagens pelo eixo x e as envia para o registrador de sincronização, que por sua vez controla um gerador de rampa. Quando a tensão do sinal de rampa ultrapassa a voltagem de entrada, um sinal é enviado para a unidade lógica (gerando um pulso em Q1 ou Q2 de maneira alternada). Ajustando a voltagem de entrada podemos então ajustar o ângulo de disparo.

Para cada onda um pulso é gerado na saída Q1 defasado do ângulo de disparo em relação a tensão de linha e em Q2 um pulso é gerado defasado do ângulo de disparo somado de  $180^\circ$ . A figura 11 ilustra esse funcionamento.

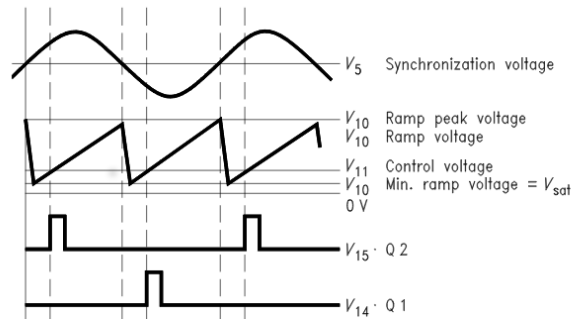


Figura 11: Esquema de funcionamento do CI TCA785 [SIEMENS, 2005]

## 4 Referências

[SIEMENS, 2005] SIEMENS, 2005. **TCA 785 - Phase Control IC.**

[TEMPLETON, 2008] TEMPLETON, G., 2008. **RC Snubber Networks For Thyristor Power Control and Transient Suppression.**