



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE
COMPUTADORES

ELECTRÓNICA DE POTÊNCIA

Conversor CA/CC Monofásico Comandado de Onda Completa

Rectificador de onda completa totalmente comandado e semi-comandado

João Bernardo Sequeira de Sá	n.º 68254
Maria Margarida Dias dos Reis	n.º 73099
Rafael Augusto Maleno Charrama Gonçalves	n.º 73786
Nuno Miguel Rodrigues Machado	n.º 74236

Turno de Segunda-feira das 17h00 - 20h00

Lisboa, 28 de Dezembro de 2015

Índice

1	Introdução	2
2	Condução do Trabalho	3
2.1	Rectificador de onda completa totalmente comandado	3
2.1.1	Carga resistiva pura (R)	3
2.1.2	Carga indutiva RL	5
2.2	Rectificador de onda completa semi-comandado	8
2.2.1	Carga indutiva RL	8
3	Simulações	12
3.1	Circuitos de Potência usados	12
3.1.1	Rectificador de onda completa com comando total e carga resistiva, R . .	13
3.1.2	Rectificador de onda completa com comando total e carga RL	14
3.1.3	Rectificador de onda completa semi-comandado com carga RL	15

1 Introdução

Este trabalho laboratorial é uma continuação do trabalho 2A em que se estudou o conversor CA/CC (rectificador) de meia onda comandado e semi-comandado monofásico. Desta vez o objetivo é compreender o funcionamento do rectificador monofásico comandado de onda completa.

Este trabalho está separado em duas partes; na primeira estuda-se o funcionamento do conversor totalmente comandado e na segunda o semi-comandado.

Aquilo que distingue o rectificador de onda completa do de meia onda é a presença de 4 tiristores, tal como pode ser observado na Figura 1, em oposição a apenas 1 tiristor como se tinha no rectificador de meia onda.

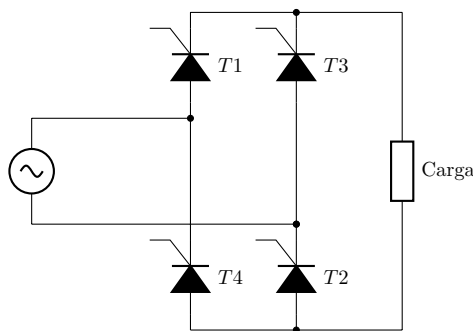


Figura 1: Esquema do rectificador de onda completa monofásico comandado.

O funcionamento desta topologia depende de qual o par de tiristores que está a conduzir a uma dada altura. Fazendo uso da nomenclatura da Figura 1 observa-se que T1 e T2 podem ser disparados durante a alternância positiva da tensão de entrada, sendo que T4 e T3 podem ser disparados durante a alternância negativa [1]. Para o primeiro caso tem-se que o ângulo de disparo, α , pode variar entre 0 e π onde para o segundo caso se faz uso de $\alpha + \pi$. Tal como já foi visto no trabalho anterior a altura em que um tiristor entra ao corte depende do momento em que a corrente aos terminais deste passa por zero, pelo que o funcionamento para uma carga puramente resistiva difere do de uma carga indutiva.

Espera-se assim que as formas de onda para a tensão e corrente numa carga indutiva seja tal como se vê na Figura 2.

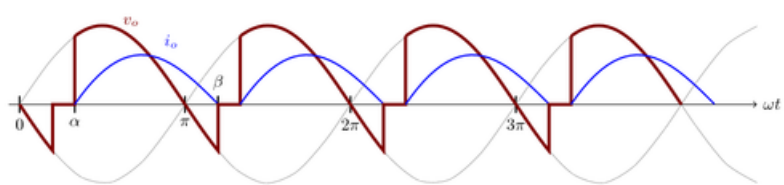


Figura 2: Formas de onda para carga indutiva.

O resultado é que, ao contrário do rectificador de meia onda, tanto para a alternância positiva da tensão de entrada, como para a negativa, se irá ter corrente na carga; obtém-se um comportamento desta corrente muito mais próximo do contínuo e um conteúdo harmónico substancialmente inferior. Observa-se também que devido a isto, o valor médio da corrente na

entrada será zero.

Para a segunda parte do trabalho tem-se um rectificador semi-comandado, onde se substitui dois dos rectificadores por dois díodos. Isto pode ser feito caso a carga não exija inversão da tensão aos seus terminais, sendo neste caso imposição da topologia que a tensão de saída tenha sempre o mesmo sinal, devido à presença dos díodos.

2 Condução do Trabalho

2.1 Rectificador de onda completa totalmente comandado

2.1.1 Carga resistiva pura (R)

De maneira a analisar o funcionamento do circuito com cargas resistivas, foi ligado à saída do rectificador de onda completa controlado um reóstato.

2.1.1.1 Formas de onda da tensão e corrente na entrada

Inicialmente, observou-se a forma de onda da tensão e da corrente na entrada do circuito.

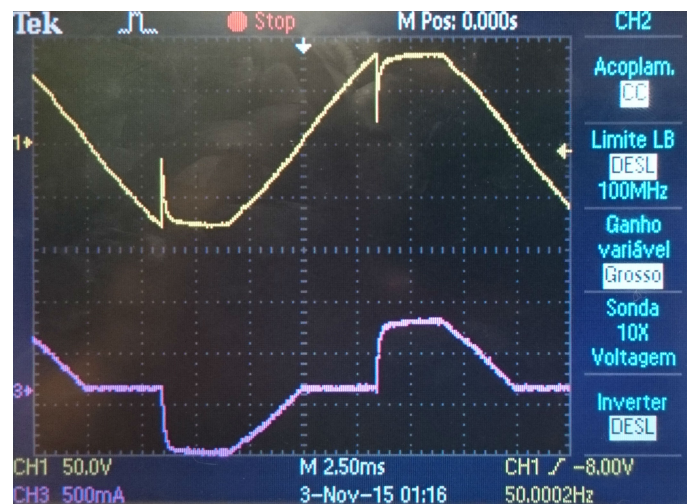


Figura 3: Tensão (a amarelo) e corrente (a rosa) na entrada.

Na Figura 3 observam-se quedas de tensão na entrada sempre que tiristores entram à condução.

Como a carga é resistiva, a corrente é proporcional à tensão. Quando a tensão de entrada se anula, a corrente anula-se e os dispositivos que estão a conduzir passam ao corte. Como os tiristores complementares não são imediatamente activados ($\alpha > 0$), a corrente mantém-se a zero até ao disparo.

2.1.1.2 Formas de onda da tensão e corrente na carga

Na carga é possível observar a rectificação da onda completa, e as características resistivas da mesma.

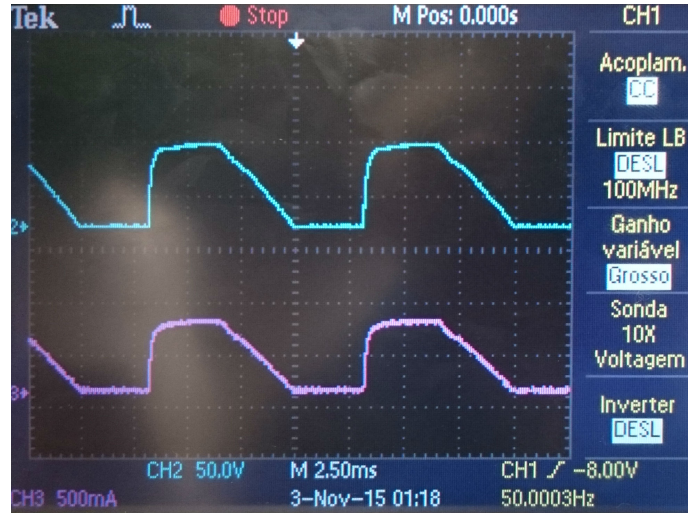


Figura 4: Tensão (a azul) e corrente (a rosa) na carga.

2.1.1.3 Formas de onda da tensão e corrente no tiristor

Cada par de tiristores conduz alternadamente com o par complementar.



Figura 5: Tensão (a amarelo) e corrente (a rosa) no tiristor.

Na Figura 5 observa-se a parte da corrente da carga que corresponde ao tiristores em questão, sendo que durante a condução, o tiristor está em curto-circuito.

Quando o dispositivo passa ao corte, “cai sobre si” toda a tensão de entrada.

2.1.1.4 Característica de comando do conversor

De maneira a calcular uma previsão teórica do valor médio da tensão de saída, foi utilizada a Equação 2.1.

$$\overline{v_O} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.1)$$

Ângulo de Disparo [$^{\circ}$]	V_O [V] (teórico)	V_O [V] (experimental)
0	45	48
30	42	46.2
60	33.8	37.9
90	22.5	25.6
120	11.25	12.8
150	3.02	1.48

Tabela 1: Valor médio da tensão de saída em função do ângulo de disparo ($V_i = 50$ V)

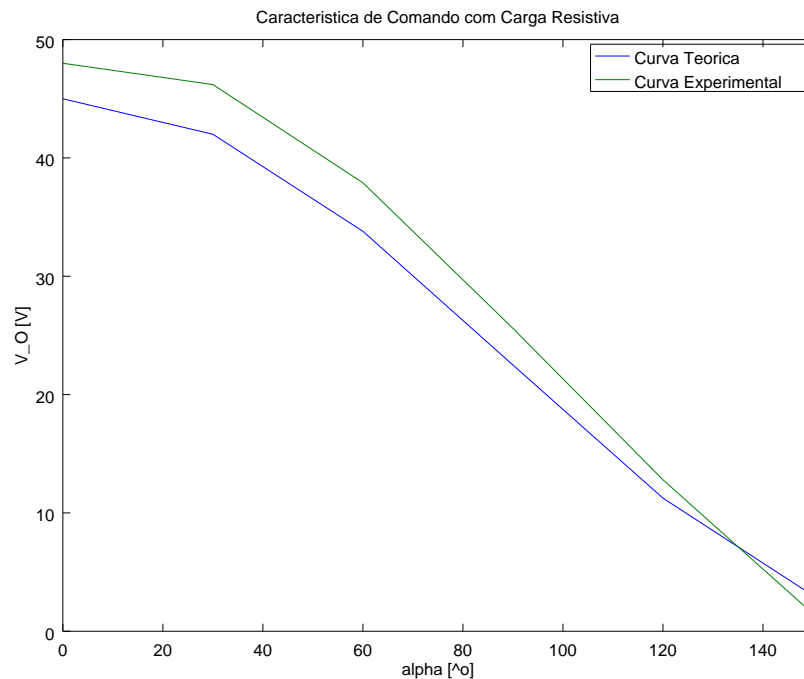


Figura 6: Característica de comando do retificador de onda completa totalmente comandado com carga resistiva - teórica e experimental.

Um dos motivos pelos quais há diferenças entre os valores teóricos e os valores medidos é a deformação do sinal de entrada, que está longe de ser uma sinusóide.

2.1.2 Carga indutiva RL

2.1.2.1 Formas de onda da tensão e corrente na carga para funcionamento lacunar

Quando a carga tem uma componente indutiva substancial (na realidade, qualquer porção de circuito constitui uma espira, e portanto tem uma indutância, sendo que na maioria dos casos esta indutância é desprezável), a corrente passa a ter uma inércia associada, isto é, torna-se numa variável de estado.

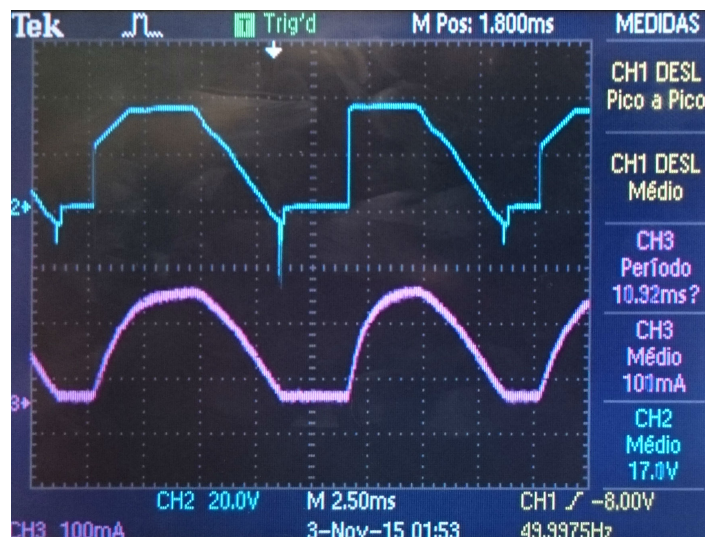


Figura 7: Tensão (a azul) e corrente (a rosa) na carga.

Quando a tensão se anula, ainda existe corrente. Assim, a condução do tiristor continua até que esta se anule, quando a tensão já está na arcada negativa.

A tensão média na bobina é necessariamente 0 V (caso contrário, a corrente na bobina dispararia para infinito, queimando-se entretanto), pelo que a tensão média da resistência é igual à tensão média na carga.

2.1.2.2 Formas de onda da tensão e corrente no tiristor

Em cada braço do rectificador vai passar a corrente correspondente a uma das arcadas.

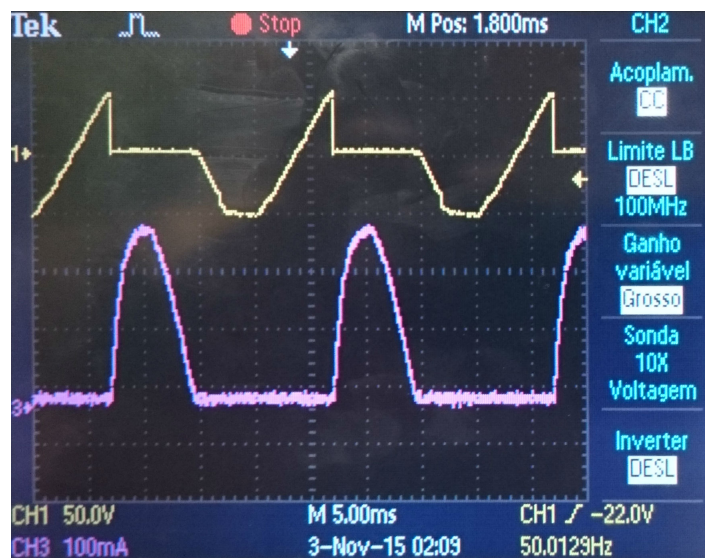


Figura 8: Tensão (a amarelo) e corrente (a rosa) no tiristor.

2.1.2.3 Característica de comando do conversor

As previsões teóricas foram feitas com recurso às Equações 2.2 a 2.5.

$$\Phi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.2)$$

$$0 = \sin(\Phi - \alpha) e^{-\frac{R}{L} \frac{\gamma}{\omega}} + \sin(\alpha + \gamma - \phi) \quad (2.3)$$

$$\overline{v_O} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sqrt{2}V \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.4)$$

$$\overline{v_O} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (-\cos(\alpha + \gamma) + \cos(\alpha)) \quad (2.5)$$

Uma vez calculados os valores de γ através da Equação 2.3, foram calculados os valores médios da tensão graças à Equação 2.4, para todos os valores de α excepto $\alpha = 0^\circ$.

Para $\alpha = 0^\circ$, como $\alpha < \Phi$, o circuito funciona em regime não lacunar, pelo que o valor teórico foi calculado com recurso à Equação 2.1.

Ângulo de Disparo $[\circ]$	V_O [V] (teórico)	V_O [V] (experimental)
0	31.5	31.9
30	29.1	26.5
60	23.4	19
90	15.5	11.2
120	7.6	4.7
150	1.87	0.6

Tabela 2: Valor médio da tensão de saída em função do ângulo de disparo ($V_i = 35$ V)

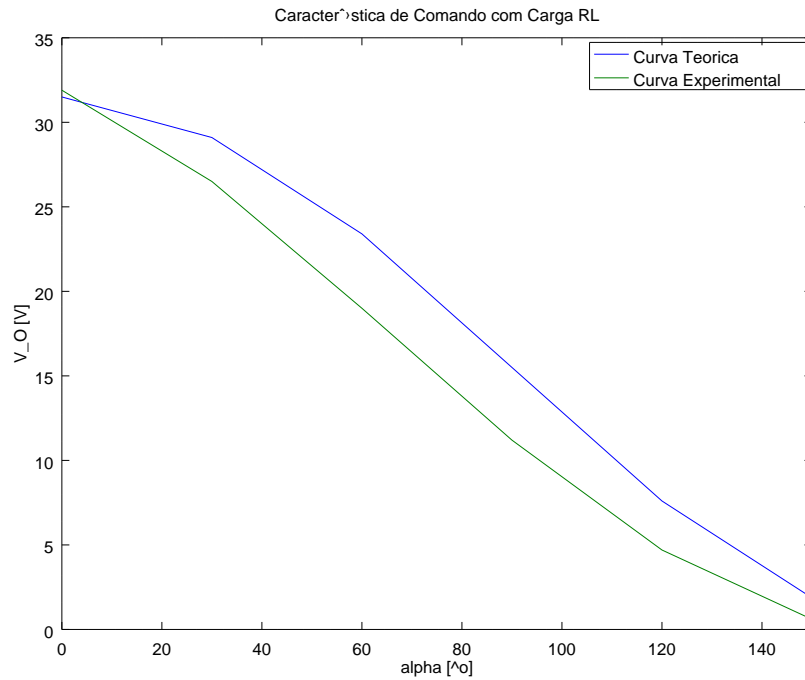


Figura 9: Característica de comando do rectificador de onda completa totalmente comandado com carga indutiva RL - teórica e experimental.

Na Figura 9 pode observar-se a previsão teórica da característica face aos valores obtidos. A diferença pode dever-se a diversos factores, como a dificuldade de colocação do reóstato no valor pretendido, bem como diversas outras imperfeições nos dispositivos.

Uma vez mais, o sinal de entrada não é uma sinusóide perfeita (longe disso), pelo que esse factor também interfere com a característica.

2.2 Rectificador de onda completa semi-comandado

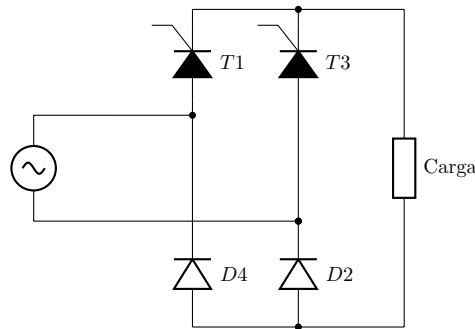


Figura 10: Esquema do rectificador de onda completa monofásico semi-comandado

De maneira a observar o funcionamento do rectificador semi-comandado, os tiristores $T2$ e $T4$, isto é, os correspondentes ao troço inferior de cada braço do rectificador, foram substituídos por díodos.

2.2.1 Carga indutiva RL

2.2.1.1 Formas de onda da tensão e corrente na entrada

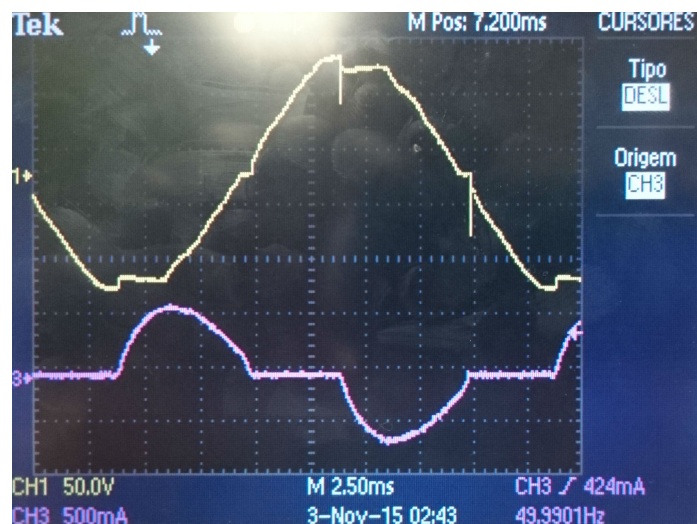


Figura 11: Tensão (a amarelo) e corrente (a rosa) na entrada.

Na entrada do circuito, é possível observar pequenos picos na tensão sempre que um dispositivo (tiristor ou diódo) passam da condução ao corte, e vice versa.

2.2.1.2 Formas de onda da tensão e corrente na carga

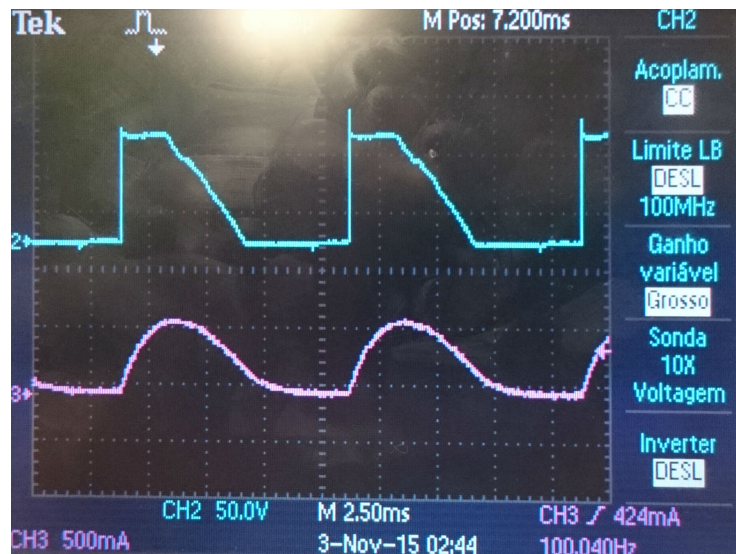


Figura 12: Tensão (a azul) e corrente (a rosa) na carga.

Na carga verifica-se que a tensão é sempre positiva, ao contrário da situação anterior. Uma vez que continua a haver a mesma inércia da corrente (causada pela bobina), a justificação pela qual a tensão deixa de tomar valores negativos só se pode dever à substituição dos dois tiristores por díodos.

Após constatar esse facto, é fácil perceber que os tiristores necessitam impulso de *gate* para conduzir, que os díodos, evidentemente, não precisam.

Assim, quando a tensão de alimentação passa à arcada negativa, a continuidade da corrente da carga é assegurada pelos díodos (na situação anterior, como os tiristores não tinham impulso de *gate* nesse instante, o mesmo não se verificava).

2.2.1.3 Formas de onda da tensão e corrente nos díodos

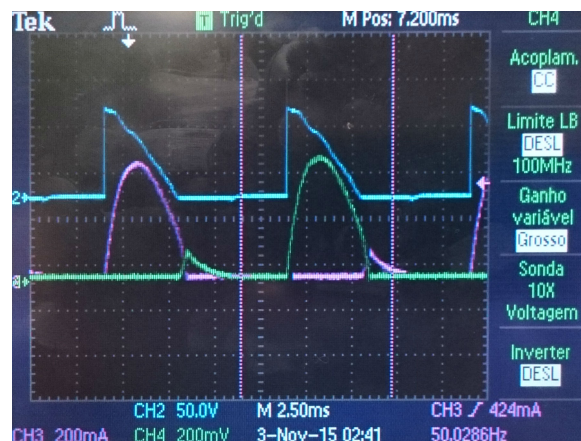


Figura 13: Tensão de saída (a azul), corrente em um dos díodos (a rosa), e corrente no díodo complementar (a verde)

É possível observar a continuidade da corrente garantida pelos díodos complementares entre si, sendo que a soma das correntes dos dois díodos corresponde à corrente da carga.

2.2.1.4 Característica de comando do conversor

De maneira a calcular o valor médio da tensão na carga, foi utilizada uma expressão semelhante à Equação 2.4 da questão anterior, mas uma vez que independentemente do ângulo de condução γ , a tensão é cortada para $\omega t = \pi$, o limite superior de integração da tensão é π .

A expressão resultante é portanto idêntica à da tensão média para o rectificador de onda completa totalmente controlado, Equação 2.1.

Ângulo de Disparo [°]	V_O [V] (teórico)	V_O [V] (experimental)
0	72.03	72.7
30	67.2	69.8
60	54.02	53.2
90	36.01	39.5
120	18.01	18.3
150	4.82	4.73

Tabela 3: Valor médio da tensão de saída em função do ângulo de disparo ($V_i = 80V$)

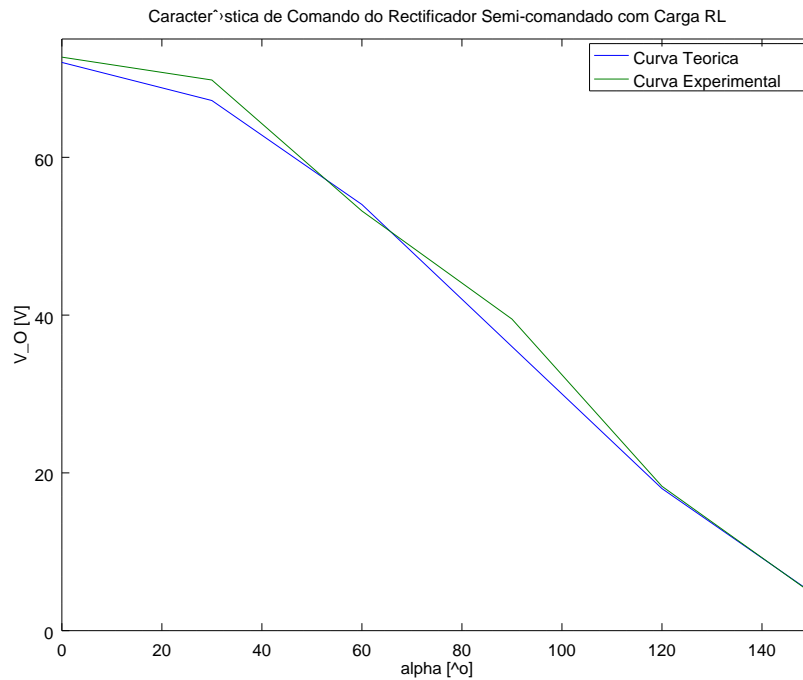


Figura 14: Característica de comando do rectificador de onda completa semi-comandado com carga indutiva RL - teórica e experimental.

Na Figura 14 verifica-se uma melhor correspondência entre a previsão teórica e os resultados experimentais.

2.2.1.5 Conclusões

A corrente na carga nunca é negativa, uma vez que isso exigiria que pelo menos um dos dois

díodos (ou, no caso anterior, pelo menos um dos dois tiristores) conduzisse enquanto inversamente polarizados. Isso levaria à destruição do dispositivo.

Como tal, seria impossível controlar um motor com travagem regenerativa, uma vez que o processo de devolução de potência à fonte exigiria correntes negativas na carga.

Um filtro de saída teria de ser um filtro de 1ª ordem na forma de uma bobina em série com a carga. Ao colocar um condensador, o valor mínimo da tensão de saída deixaria de ser 0, pelo que os tiristores deixariam de conduzir em todos os ângulos de disparo $0 \leq \alpha \leq \pi$. Para além dessa diminuição da margem de controlo sobre o circuito, a potência entregue pelo rectificador à carga também se reduz, o que é indesejável.

3 Simulações

3.1 Circuitos de Potência usados

Neste projeto foram utilizados três circuitos de potência: um retificador de onda completa totalmente comandado, quer com carga resistiva, quer com carga RL, e um retificador de onda completa semi-comandado com carga RL.

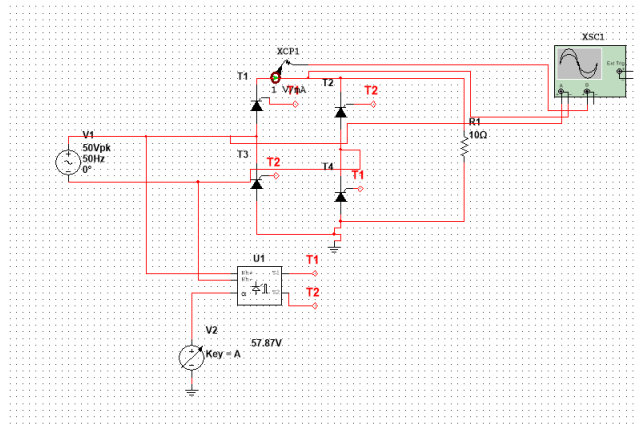


Figura 15: Rectificador de onda completa com comando total e carga resistiva R.

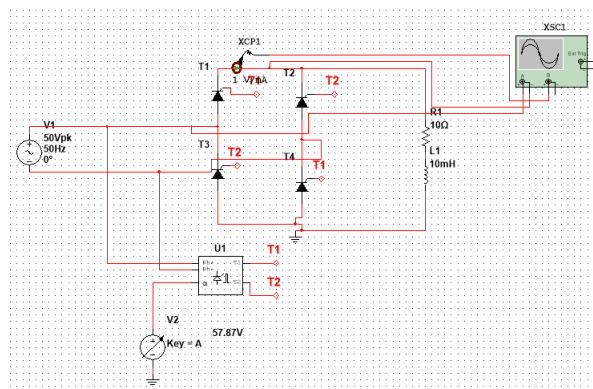


Figura 16: Rectificador de onda completa com comando total e carga RL.

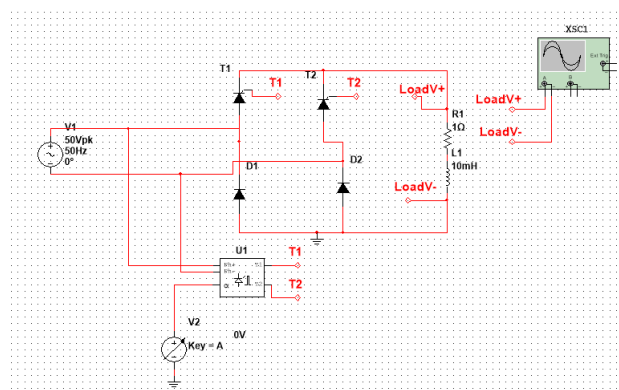


Figura 17: Rectificador onda completa semi-comandado e carga RL.

É importante referir que, para a simulação do circuito de disparos, se definiu que iria ser utilizado um *drive* que impulsos com uma frequência de 50 Hz. Pode-se controlar o ângulo de disparo com uma fonte DC interactiva. Na Figura 18 está representado o sinal do gerador de impulsos com a tensão de entrada.

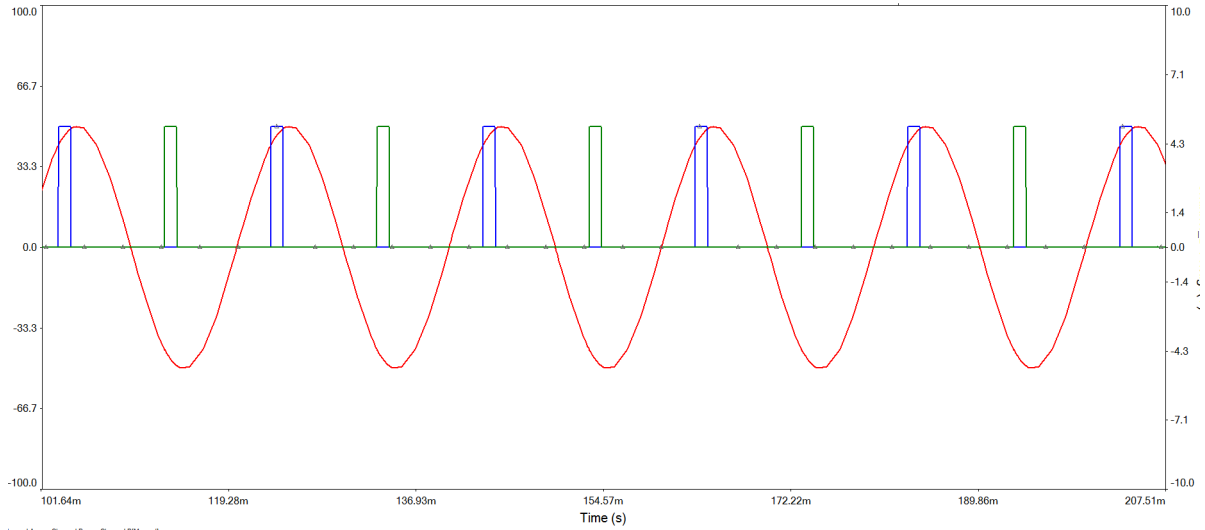


Figura 18: Tensão de entrada (a vermelho) e sinal da *gate* do tiristor (a azul), bem como o seu complementar (a verde).

3.1.1 Rectificador de onda completa com comando total e carga resistiva, R

A Figura 19 tem representadas as formas de onda para a tensão e corrente de entrada.

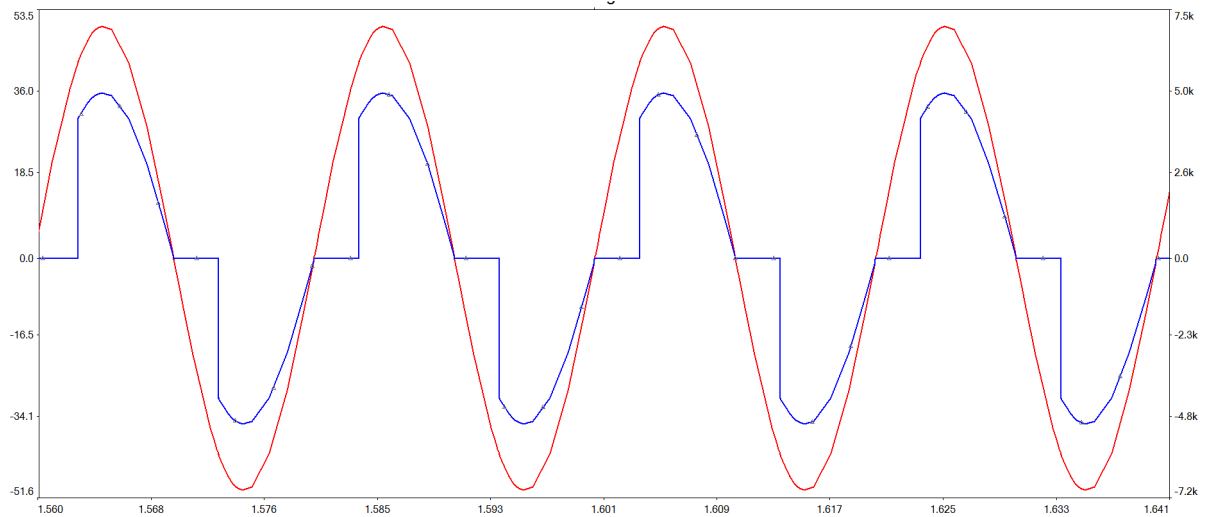


Figura 19: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) de entrada.

As formas de onda referentes à saída, isto é, à carga, podem ser visualizadas na Figura 20.

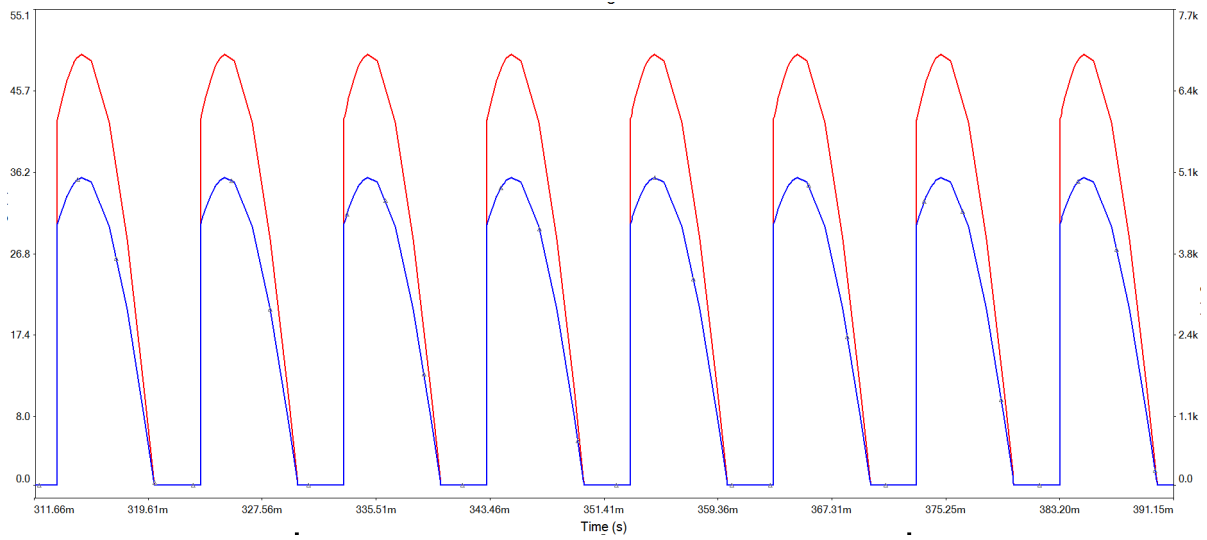


Figura 20: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) de saída.

Já as formas de onda da tensão e da corrente de um dos tiristores podem ser visualizadas na Figura 21

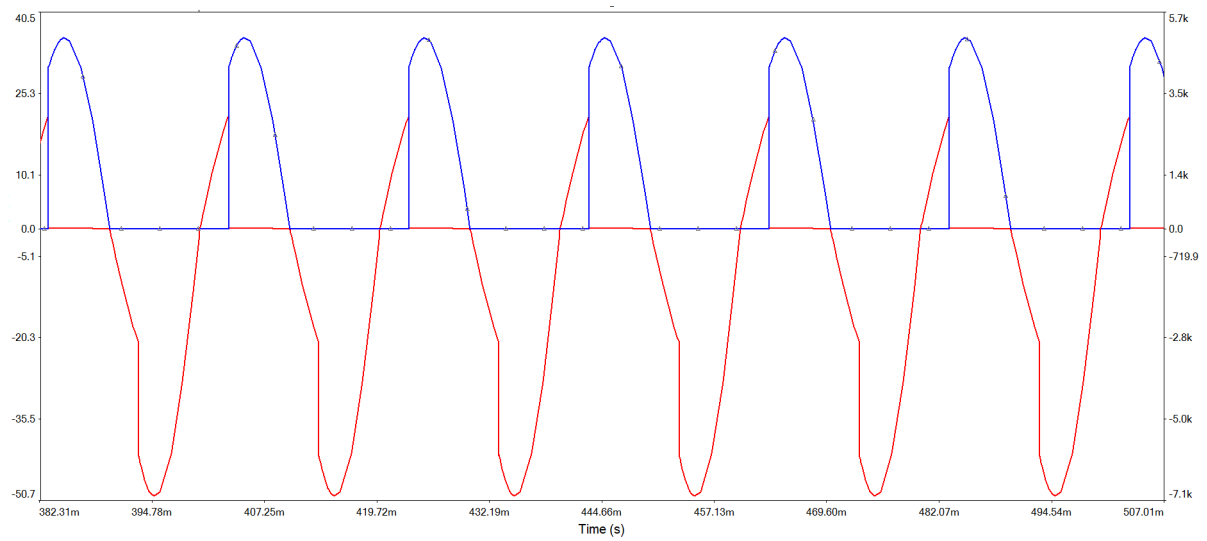


Figura 21: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) do tiristor.

3.1.2 Rectificador de onda completa com comando total e carga RL

De igual forma é importante visualizar o comportamento da tensão e da corrente no circuito com uma carga RL . Os sinais à saída estão representados na Figura 22, e para o tiristor estão representados na Figura 23.

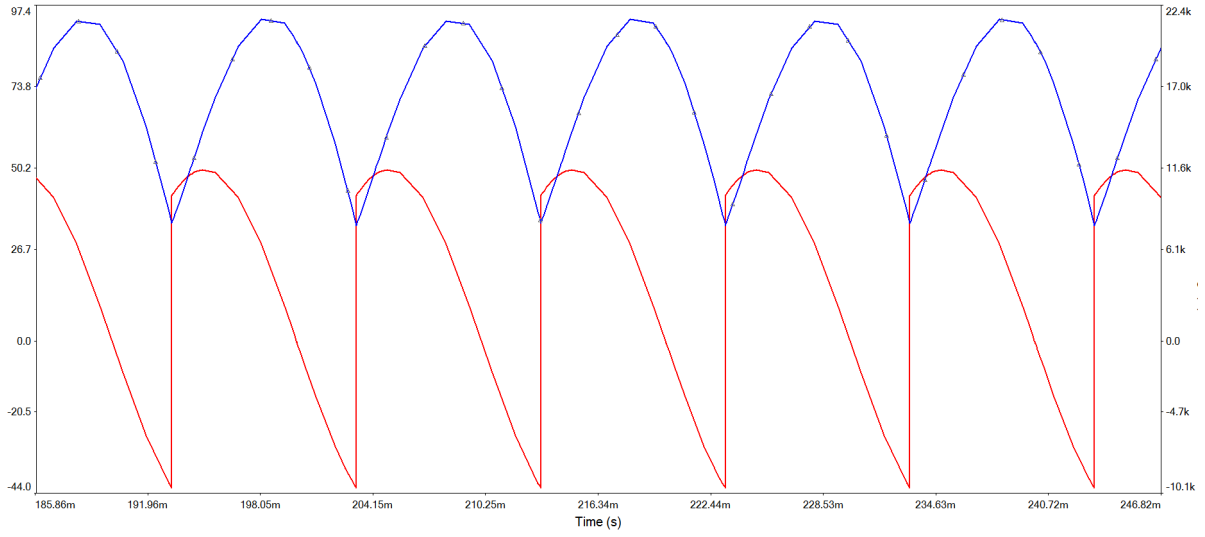


Figura 22: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) de saída.

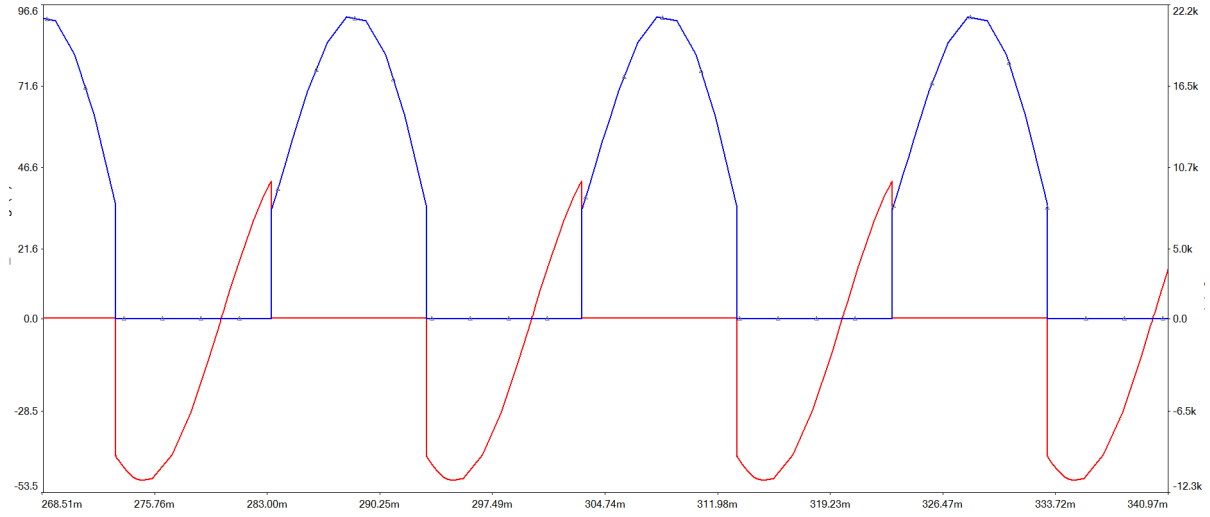


Figura 23: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) do tiristor.

3.1.3 Rectificador de onda completa semi-comandado com carga RL

De igual forma é importante visualizar o comportamento da tensão e da corrente no rectificador com uma carga RL e díodos de roda livre. Os sinais à saída estão representados na Figura 24, e no tiristor estão representados na Figura 25.

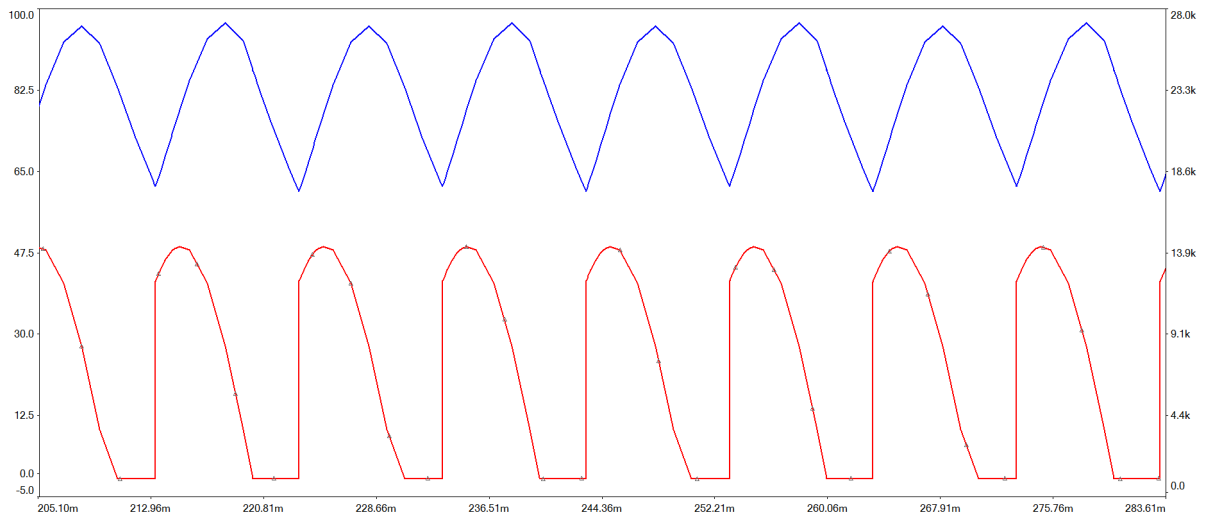


Figura 24: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) de saída.

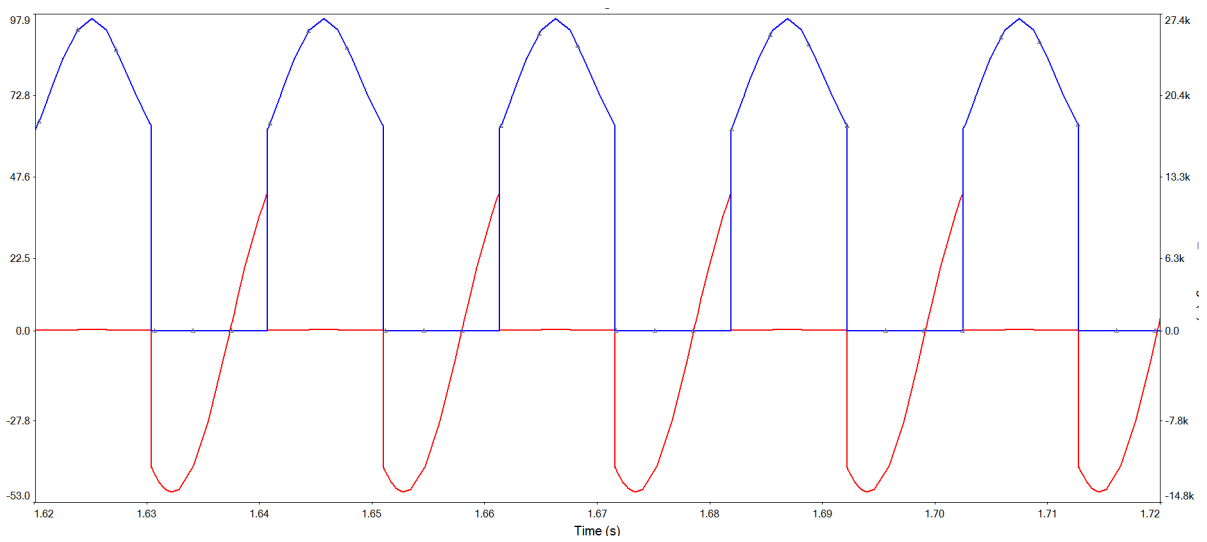


Figura 25: Tensão (a vermelho) e corrente (a azul) do tiristor.

Referências

- [1] Silva, Fernando (1998), Eletrônica Industrial, Fundação Calouste Gulbenkian