

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
EEL 7074 -ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

PATRIK LOFF PERES
20103830
PEDRO AFONSO V. ROLIM
19100422

Aula 10 - Ponte Retificadora Trifásica a Tiristor
Aula 11 - Ponte Retificadora Mista, Diodo-Tiristor

FLORIANÓPOLIS
2023

1. Introdução

Este relatório apresenta os resultados experimentais dos retificadores trifásicos em ponte a tiristor e diodo-tiristor. O experimento foi conduzido utilizando o Módulo para Experimentos em Eletrônica de Potência (MEP), permitindo a aplicação prática e mensuração de parâmetros essenciais. Além disso, a simulação dos retificadores foi realizada no software PSIM, proporcionando uma abordagem complementar para entender o comportamento teórico desses dispositivos.

2. Ponte de Graetz a Tiristor

A figura 1 mostra o circuito retificador trifásico a tiristores. O funcionamento do retificador depende do valor do ângulo de disparo dos tiristores, de forma a conduzir a tensão da fonte para a carga apenas por um determinado período de tempo, que permite controlar o valor médio da tensão na carga.

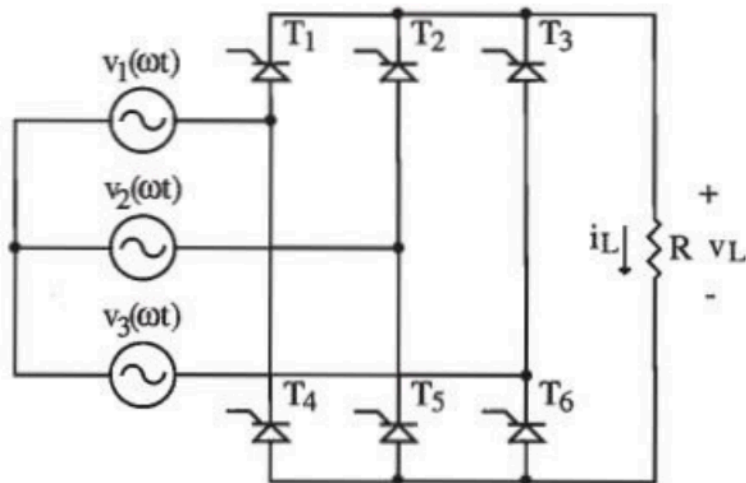


Figura 1. Retificador trifásico em ponte a tiristores

2.1 Circuito I, Carga Resistiva

Foram feitas as medições experimental e simulada no circuito da figura 2 em que a fonte de tensão de entrada trifásica é de 110 V eficaz, com uma carga sendo um resistor de $150\ \Omega$ e ângulo de disparo ajustado em 30°

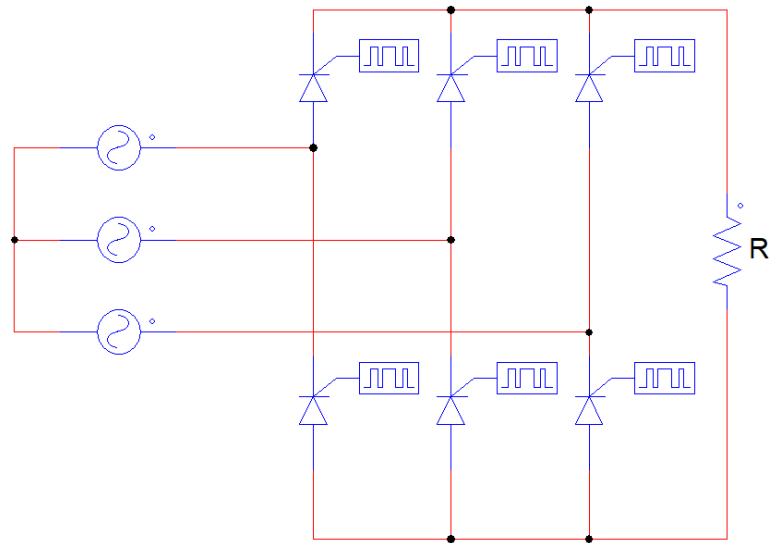


Figura 2. Circuito I simulado no PSIM

Medidas Experimentais

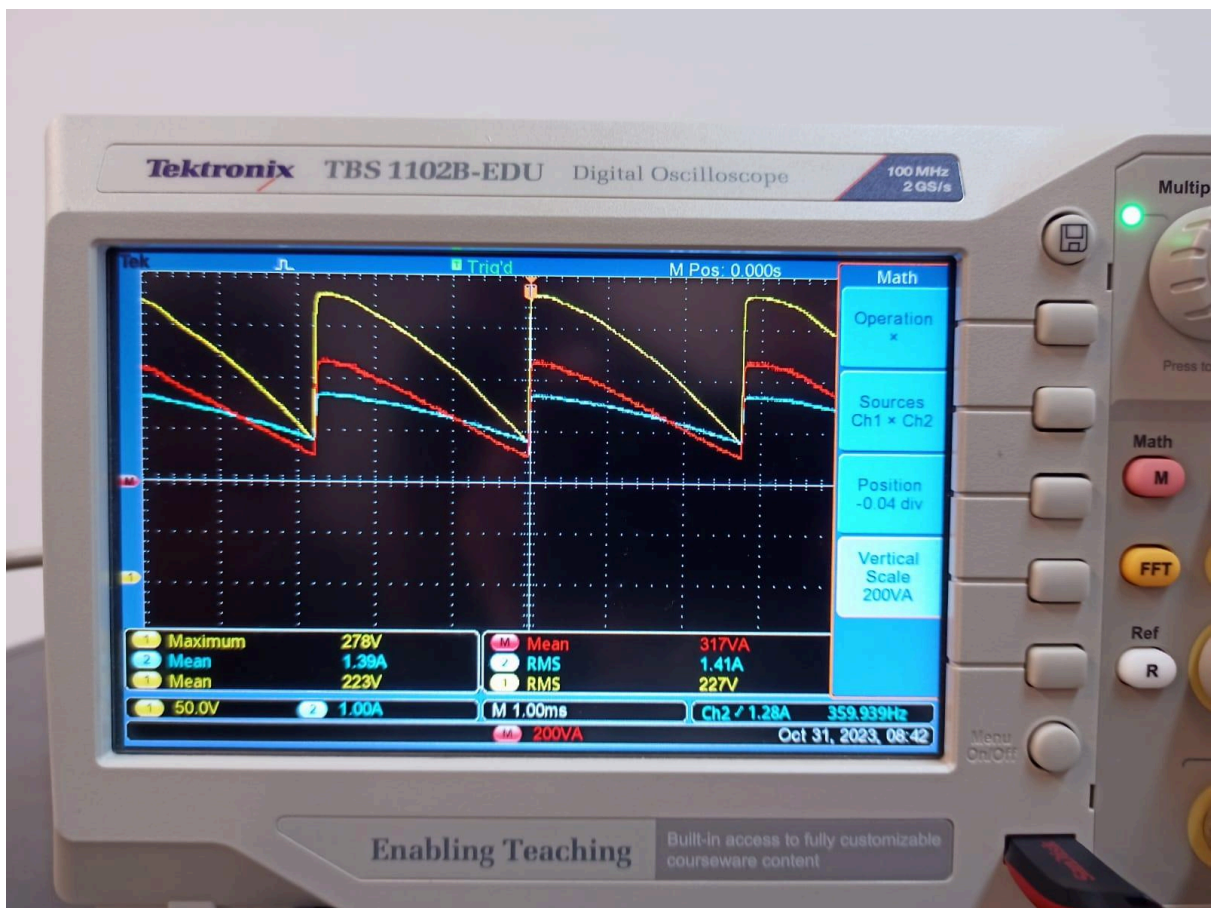


Figura 3. Tensão na carga(amarelo), Corrente na carga(azul) e potência(vermelho) Experimentais

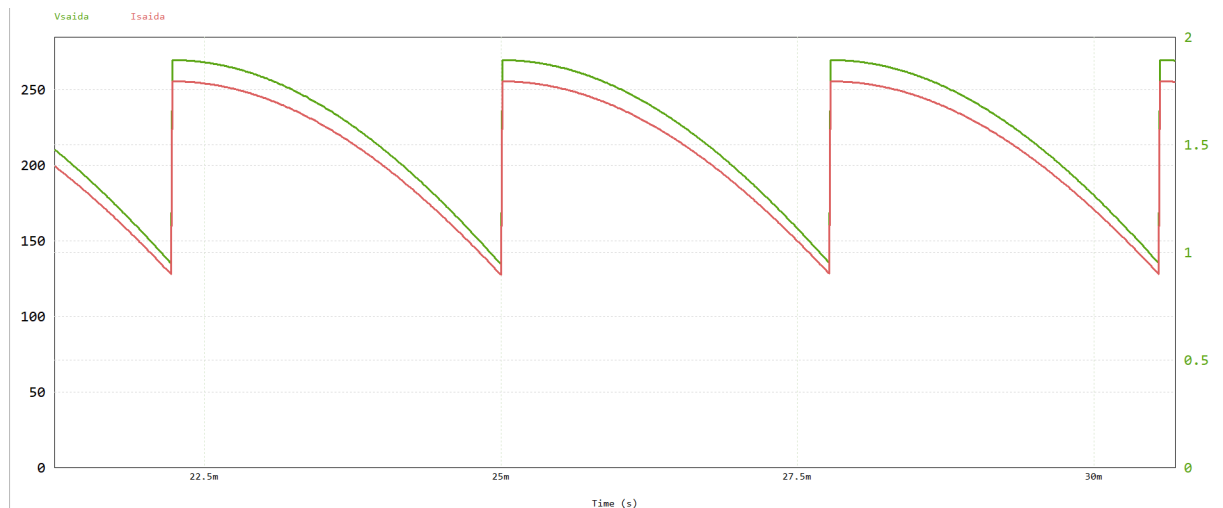


Figura 4. Tensão na carga(verde) e Corrente na carga(vermelho) Simulados

Nota-se observando os gráficos das figuras 3 e 4, que por conta do ângulo de disparo dos tiristores serem menores que 60° a tensão opera em modo de condução contínua, ou seja, em nenhum momento durante o ciclo a tensão instantânea é zero, chegando em um valor mínimo de aproximadamente 130V (tanto em simulação quanto experimentalmente).

Tabela 1 - Dados do circuito 1 para $R = 150\Omega$ e $\alpha = 30^\circ$

	Experimental	Simulação
V_{sef} (fase)	113 V	109,79 V
V_{sp} (fase)	158 V	155,56 V
I_{sef}	1,20 A	1,23 A
V_{Lmed}	223 V	223,36 V
V_{Lef}	227 V	227,00 V
I_{Lmed}	1,39 A	1,49 A
I_{Lef}	1,41 A	1,51 A
P_L	317 W	343,70 W

Os valores experimentais convergiram relativamente bem para os valores simulados, com exceção dos valores de corrente de carga, que tiveram um pequeno desvio (causando desvio também na potência) que pode ser explicado pelo fato do resistor da bancada MEP usado como carga de 150Ω não possuir exatamente este valor (que foi usado para realizar a simulação)

2.2 Circuito II, Carga RL

Para o circuito II foi adicionado um indutor de $L = 100\text{mH}$ em série com o resistor de 150Ω para formar a nova carga RL, com o ângulo de disparo dos tiristores ajustado em 60°

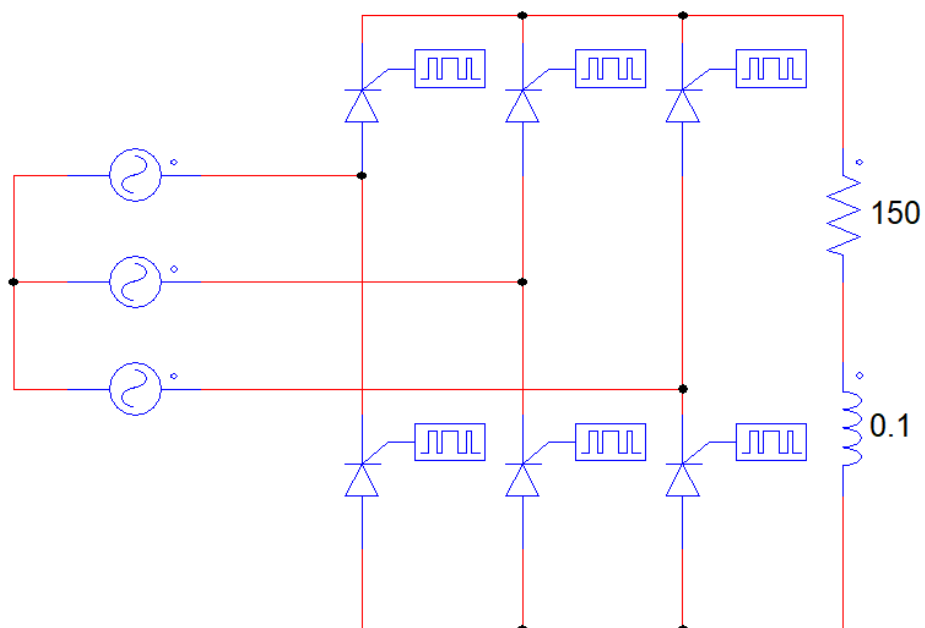


Figura 5. Circuito II simulado no PSIM

Medidas Experimentais

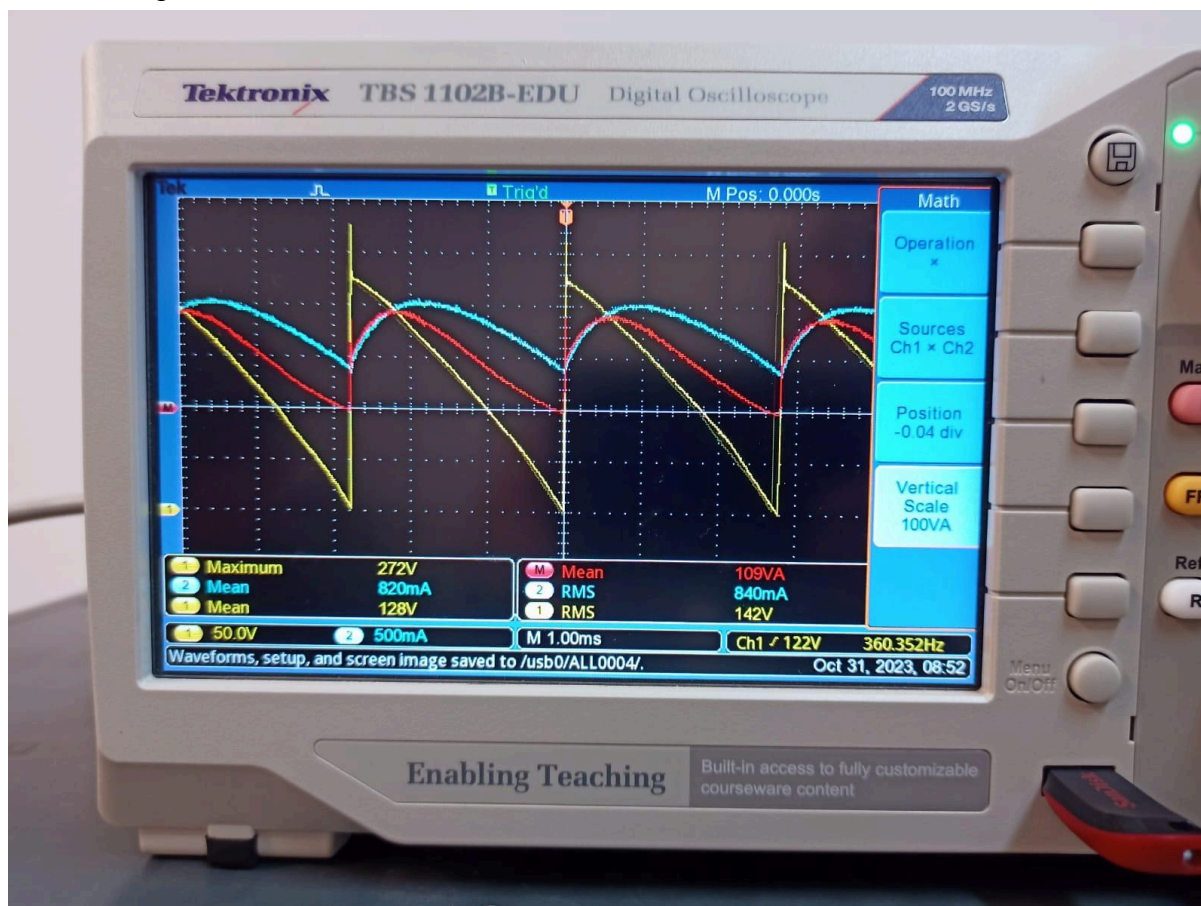


Figura 6. Tensão na carga(amarelo), Corrente na carga(azul) e potência(vermelho) Experimental

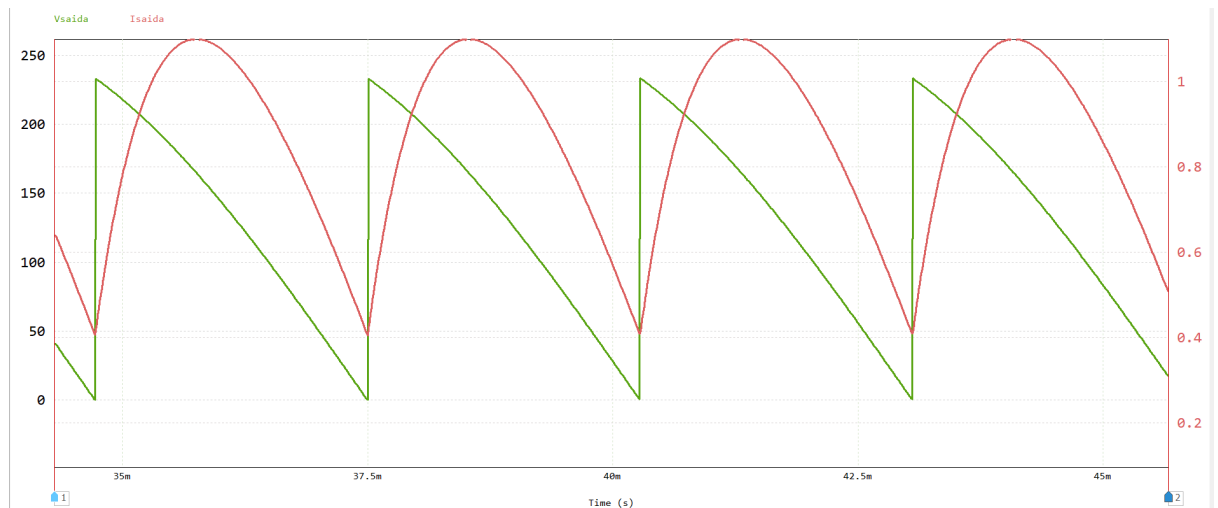


Figura 7. Tensão na carga(verde) e Corrente na carga(vermelho) Simuladas

Para esta configuração, como o ângulo de disparo dos tiristores $\alpha = 60^\circ$, o circuito opera em modo de condução descontínua, tendo em vista que o valor de tensão vai a zero em um ponto do ciclo. O valor de tensão instantâneo de tensão igual a zero acontece apenas em um ponto pois o ângulo está exatamente no limiar que define a condução em modo contínuo e descontínuo.

Tabela 2 - Dados do circuito II para $R = 150\Omega$, $L = 100\text{mH}$ e $\alpha = 60^\circ$

	Experimental	Simulação
$V_{sef}(\text{fase})$	114 V	111,42 V
$V_{sp}(\text{fase})$	160 V	155,56 V
I_{sef}	663 mA	718,21 mA
V_{Lmed}	129 V	128,51 V
V_{Lef}	143 V	146,04 V
I_{Lmed}	822 mA	854 mA
I_{Lef}	850 mA	880 mA
P_L	110 W	116,54 W

Os resultados experimentais e simulados convergiram para os mesmos valores, com pequenos desvios que podem ser explicados pela variação no valor nominal das resistências e indutâncias da carga, além de erros de medição.

3. Ponte de Graetz Mista a Diodo e Tiristor

A figura 8 mostra o circuito retificador trifásico em ponte mista a diodos e tiristores. Em contrapartida a ponte do item 2 que apenas tinha tiristores, nesta os semicondutores que conduzem no semi-ciclo negativo são diodos ao invés de tiristores, isto é feito de tal forma a

simplificar o comando do circuito, tendo em vista que os diodos não necessitam do sinal de disparo.

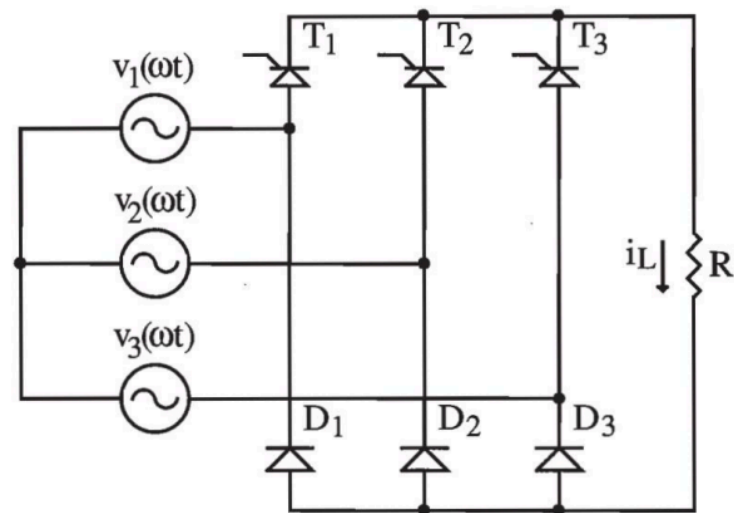


Figura 8. Retificador trifásico em ponte a diodos e tiristores

3.1 Circuito III, Carga Resistiva

Para o Circuito III foi utilizada a ponte mista a tiristores e diodos, com a tensão da fonte trifásica de 110V eficaz e inicialmente uma carga de $150\ \Omega$ com o ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$.

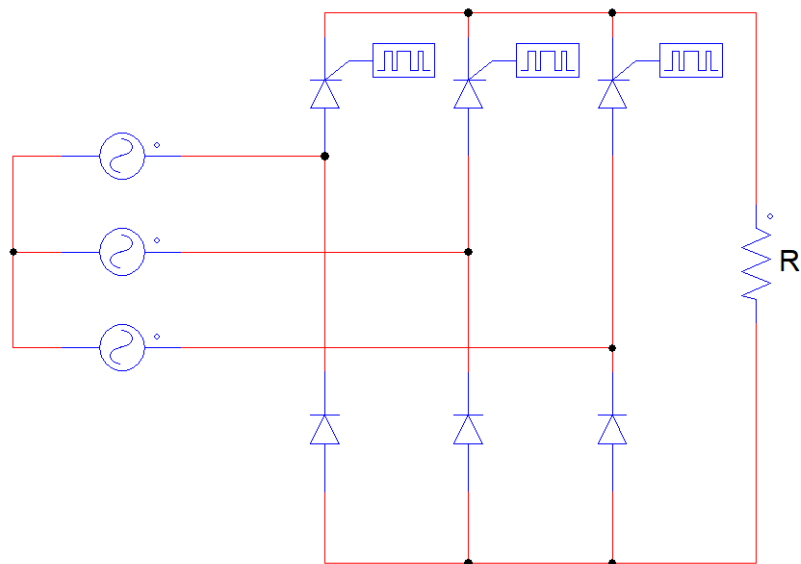


Figura 9. Circuito III simulado no PSIM

Medidas Experimentais

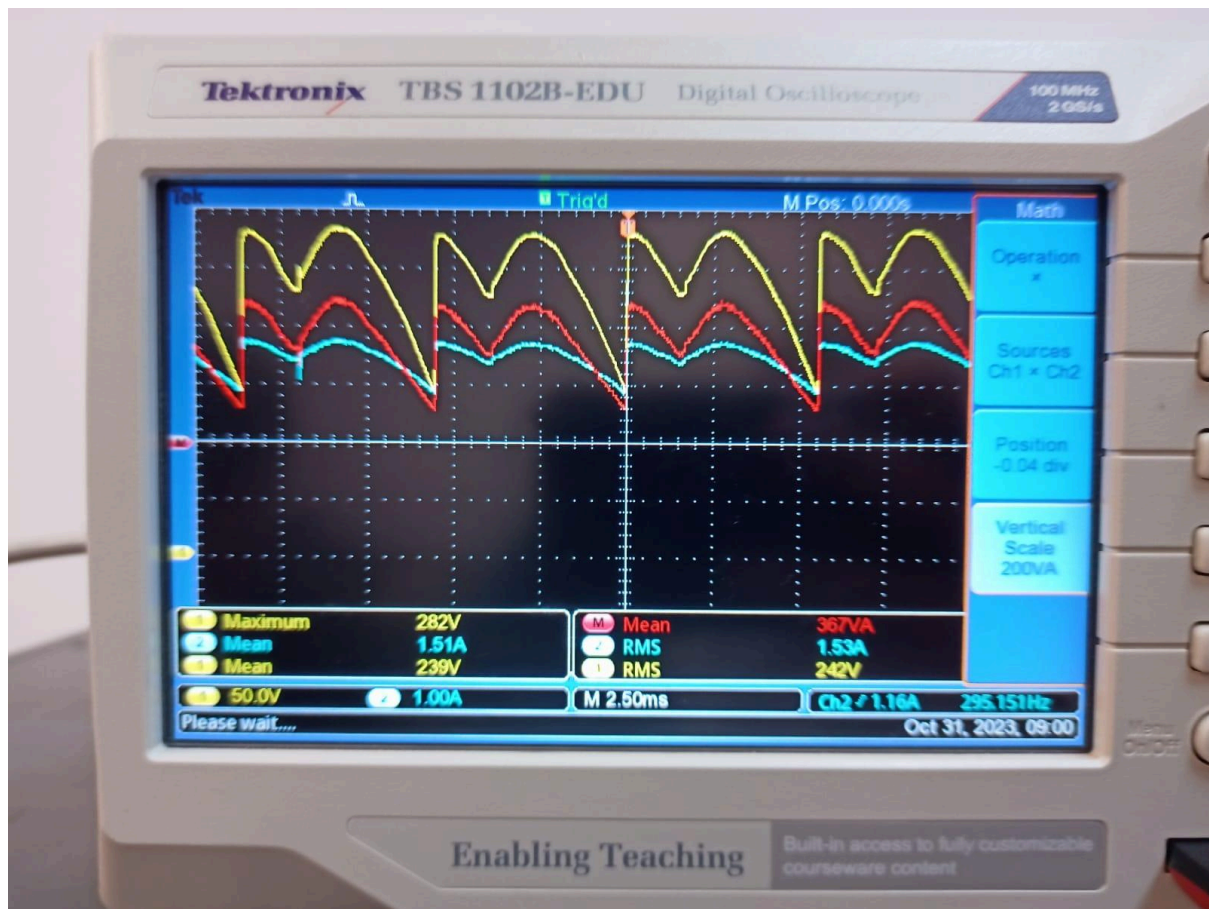


Figura 10. Tensão na carga(amarelo), Corrente na carga(azul) e potência(vermelho) Experimental

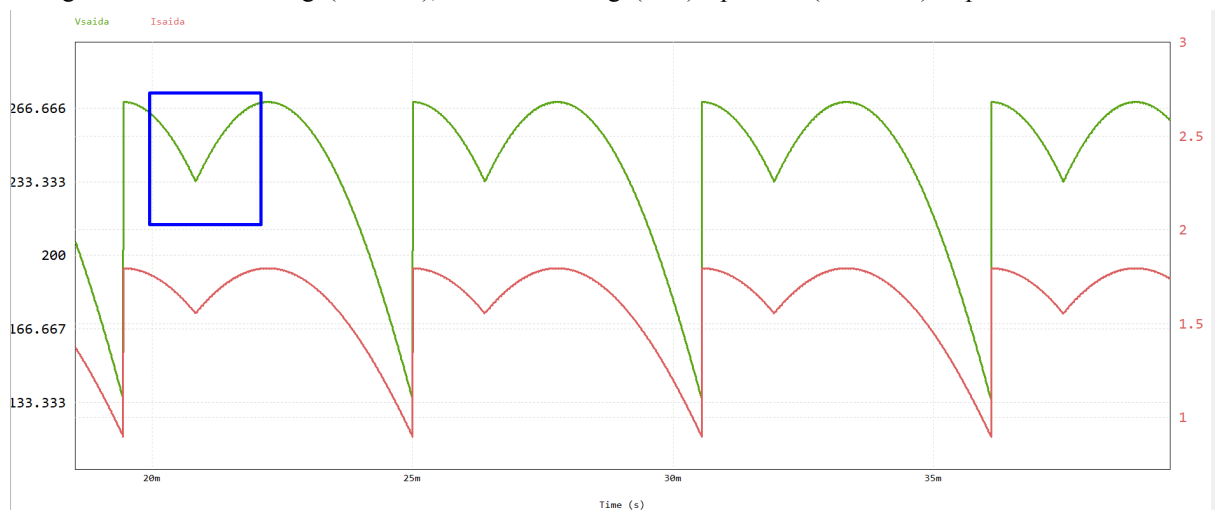


Figura 11. Tensão na carga(verde) e Corrente na carga(vermelho) Simuladas.

Como é possível notar pelos gráficos das figuras 10 e 11, em comparação com os gráficos das figuras 3 e 4, acontece a condução do semi-ciclo negativo na carga, a partir do ponto que a tensão do semiciclo positivo fica menor, como destacado pelo retângulo azul na figura 11.

Tabela 3 - Dados do circuito 1 para $R = 150\Omega$ e $\alpha = 30^\circ$

	Experimental	Simulação
$V_{sef}(\text{fase})$	112 V	111,42 V
$V_{sp}(\text{fase})$	186 V	156,56 V
I_{sef}	1,26 A	1,35 A
V_{Lmed}	239 V	240,54 V
V_{Lef}	242 V	242,89 V
I_{Lmed}	1,51 A	1,60 A
I_{Lef}	1,54 A	1,62 A
P_L	370 W	393,20 W

Os resultados experimentais e simulados convergiram para os mesmos valores, com pequenos desvios que podem ser explicados pela variação no valor nominal das resistências e indutâncias da carga, além de erros de medição, com excessão do valor de pico da tensão da fonte, que experimentalmente foi medido como 186 V quando deveria ser em torno de 156 V, o que se deve ao fato do osciloscópio não ter feito uma medição estável da tensão da fonte.

3.2 Circuito IV, Carga RL

Para o circuito IV foi adicionado um indutor em série de 100mH em série com o resistor para formar a carga RL, neste caso com ângulo de disparo dos tiristores sendo $\alpha = 60^\circ$

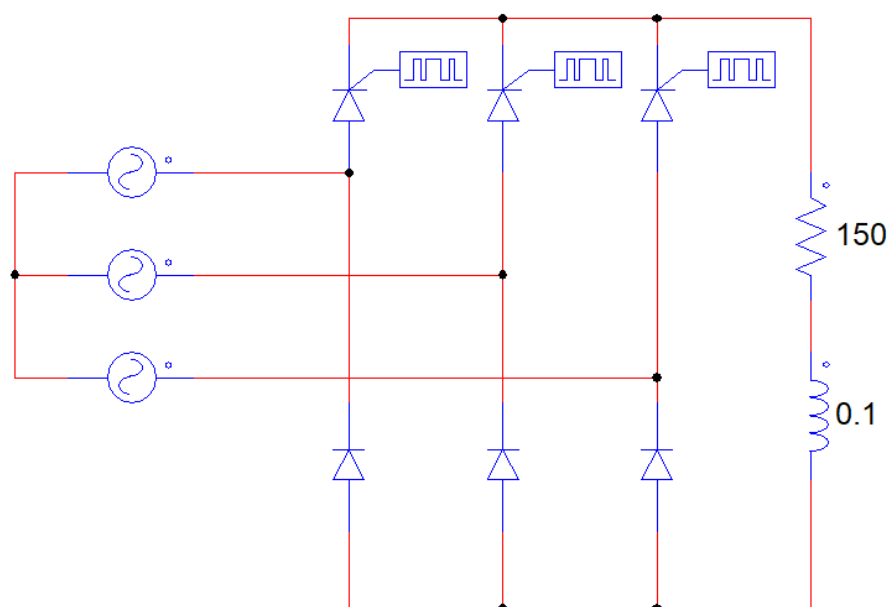


Figura 12. Circuito IV simulado no PSIM

Medidas Experimentais



Figura 13. Tensão na carga(amarelo), Corrente na carga(azul) e potência(vermelho) Experimental

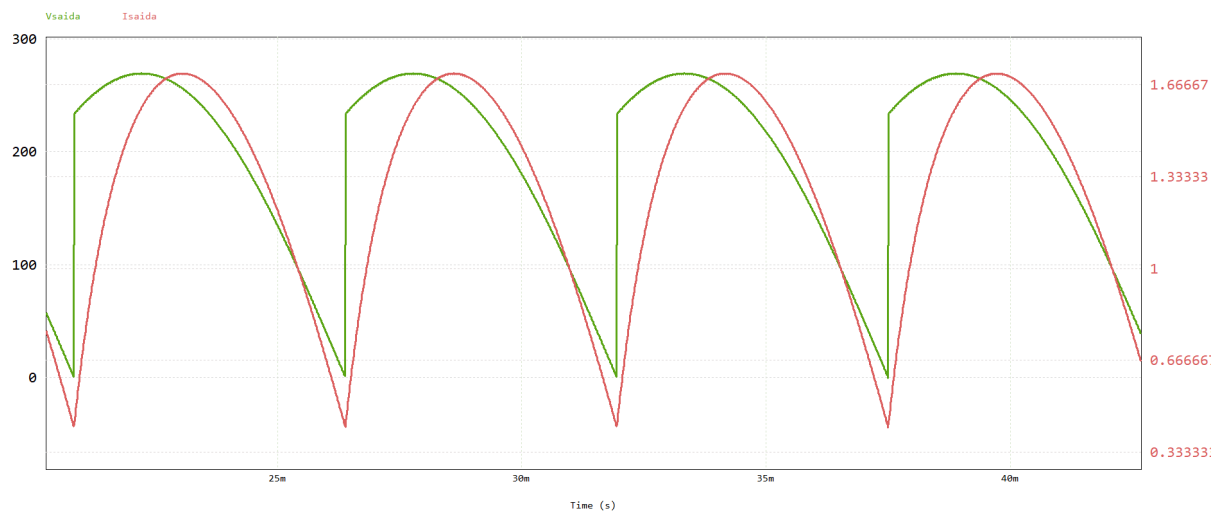


Figura 14. Tensão na carga(verde) e Corrente na carga(vermelho) Simuladas

Comparando os gráficos das figura 13 e 14 com as figuras 6 e 7 vemos que por conta do uso dos diodos no lugar do tiristores, a forma de onda da tensão não apresenta mais os picos formando uma “dente de serra”, mas uma forma de onda mais próximo de uma senóide, cortada no início pelo tiristor com o ângulo de condução maior que 0.

Tabela 4 - Dados do circuito II para $R = 150\Omega$, $L = 100\text{mH}$ e $\alpha = 60^\circ$

	Experimental	Simulação
$V_{sef}(\text{fase})$	113 V	114,04 V
$V_{sp}(\text{fase})$	160 V	155,56 V
I_{sef}	1,00 A	1,14 A
V_{Lmed}	196 V	194,05 V
V_{Lef}	212 V	210,39 V
I_{Lmed}	1,20 A	1,29 A
I_{Lef}	1,26 A	1,34 A
P_L	252 W	272,16 W

Os resultados experimentais foram de acordo com o esperado dos valores simulados. Nota-se que a potência experimental foi menor que a esperada mas dentro do aceitável, podemos atribuir a diferença no valor a não exatidão dos valores da carga na bancada do laboratório

3.3 Circuito IV, Carga RL

Agora, realizando as medições no mesmo circuito IV, com a mesma carga, apenas alterando o ângulo de disparo dos tiristores para 90° .

Medidas Experimentais

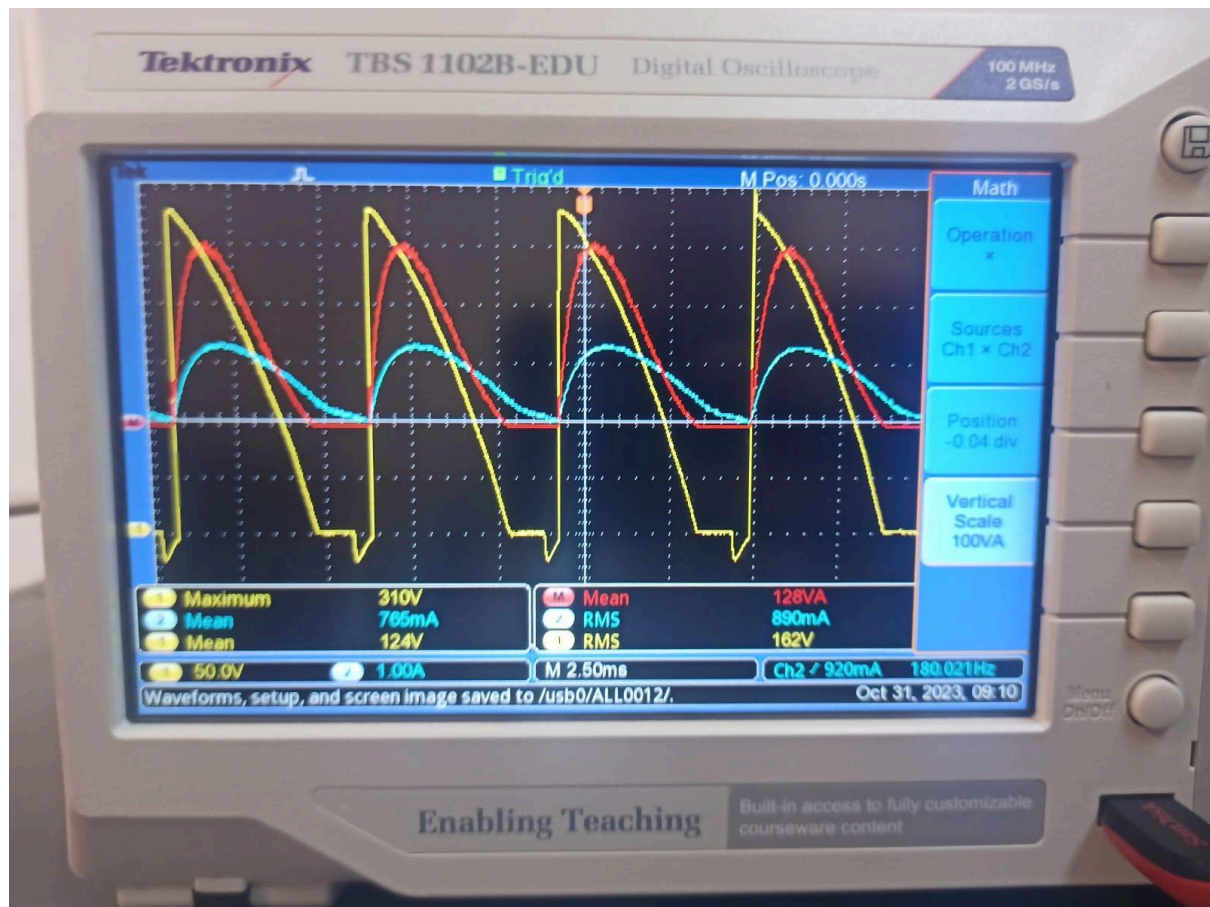


Figura 15. Tensão na carga(amarelo), Corrente na carga(azul) e potência(vermelho) Experimental

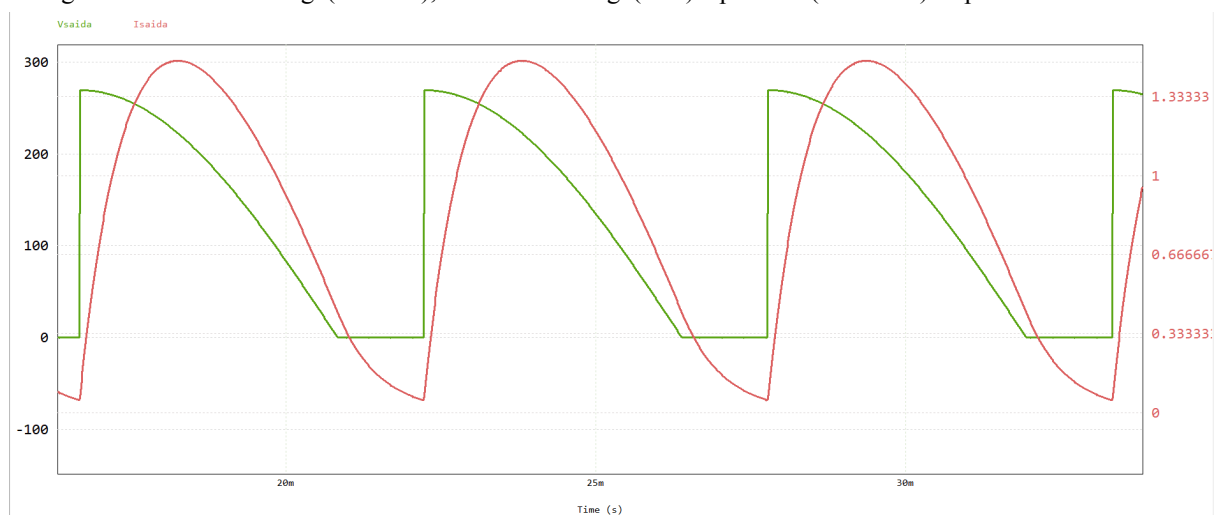


Figura 16. Tensão na carga(verde) e Corrente na carga(vermelho) Simuladas

Nesta configuração, com o ângulo de disparo dos tiristores a 90° notamos que a tensão de saída permanece com valor nulo por um curto período de tempo, diferente do ângulo de disparo de 60° , onde ao atingir o valor de 0V havia um rápido aumento na tensão que retornava ao valor de pico.

A corrente diminui seu valor de forma mais lenta ao aproximar seu valor de zero do que a corrente no mesmo circuito com o disparo dos tiristores a 60° .

Tabela 5 - Dados do circuito 1 para $R = 150\Omega$, $L = 100\text{mH}$ e $\alpha = 90^\circ$

	Experimental	Simulação
$V_{sef}(\text{fase})$	113 V	111,82 V
$V_{sp}(\text{fase})$	160 V	155,56 V
I_{sef}	688 mA	838,50 mA
V_{Lmed}	124 V	116,27 V
V_{Lef}	163 V	153,48 V
I_{Lmed}	775 mA	813,70 mA
I_{Lef}	897 mA	962,39 mA
P_L	130 W	132,58 W

Os resultados experimentais acabaram divergindo um pouco dos valores simulados. Podemos observar uma corrente eficaz na fonte menor que o esperado. Essa diferença pode ter ocorrido pela diferença de valor de resistência e indutância reais para o simulado. Devido a baixa precisão de escolha do alfa na bancada física pode ter sido utilizado um valor diferente na montagem, podendo resultar no aumento da divergência de valores.

4. Conclusão

Neste relatório foi estudado o comportamento da Ponte de Graetz, utilizando retificador trifásico a tiristores e um retificador trifásico misto a tiristores e diodos. Foram exploradas as mesmas condições sobre três cargas diferentes, uma carga puramente resistiva e duas com carga RL. Foram alterados os valores de alpha para um melhor estudo.

Os valores retirados e as formas de onda obtidas tanto experimentalmente quanto de forma simulada no software PSIM descrevem o comportamento dos dispositivos semicondutores nas condições de carga aplicadas, além de ser possível fazer a comparação entre as configurações possíveis de forma qualitativa e quantitativa.

A adição de um indutor na carga da Ponte de Graetz mista resultou na eliminação do comportamento de vale da tensão, onde a tensão de saída medida alcançava o valor de pico duas vezes dentro de um ciclo. Com isso é possível verificar a melhora do circuito como retificador ao adicionar a indutância.