



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EEL7074 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA I
RELATÓRIO 1

Retificadores de Meia Onda com Diodos e carga RL

Jade Oumura Melo
Rafael Pintar Alevato
Rafael Ruiz Peroni
Vinícius Felipe de Oliveira da Silva

Professor André Luís Kirsten

3 de Outubro de 2018

1 INTRODUÇÃO

Este experimento tem como objetivo estudar um retificador de meia onda com uma carga RL (resistor e indutor) e entender a função de um diodo de roda-livre.

O circuito a ser estudado encontra-se abaixo (figura 1). Nele, pode-se perceber uma fonte de tensão alternada ligada a um diodo, um indutor e um resistor em série.

Sabemos que o indutor (L) é um elemento atrasador de corrente e que o diodo irá parar de conduzir quando a tensão v_D for menor que zero e quando a corrente que passa por ele, neste caso, i_L for negativa também. Assim, podemos concluir que o diodo não se bloqueia em $\omega t = \pi$, e sim em um ângulo de extinção β superior a π . O gráfico teórico de tensão na fonte v , tensão no diodo v_D , tensão de saída v_L e corrente de saída i_L está mostrado na figura 2.

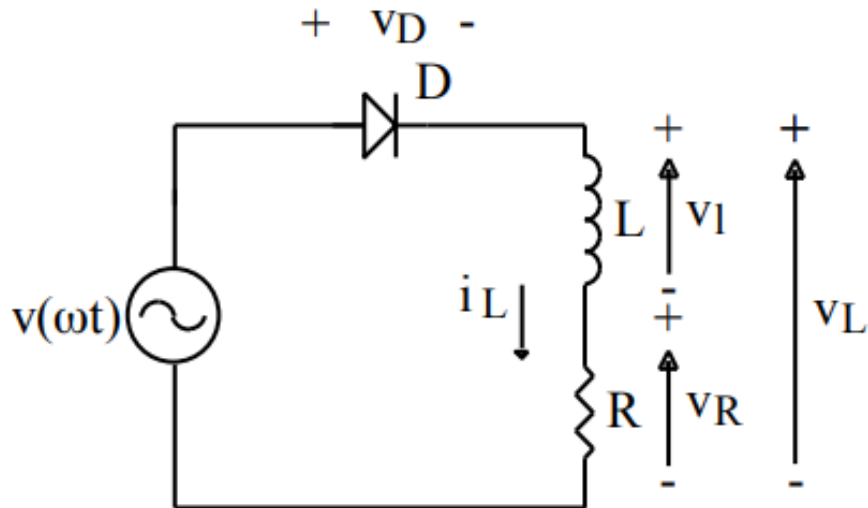


Figura 1: Retificador de meia onda com carga RL

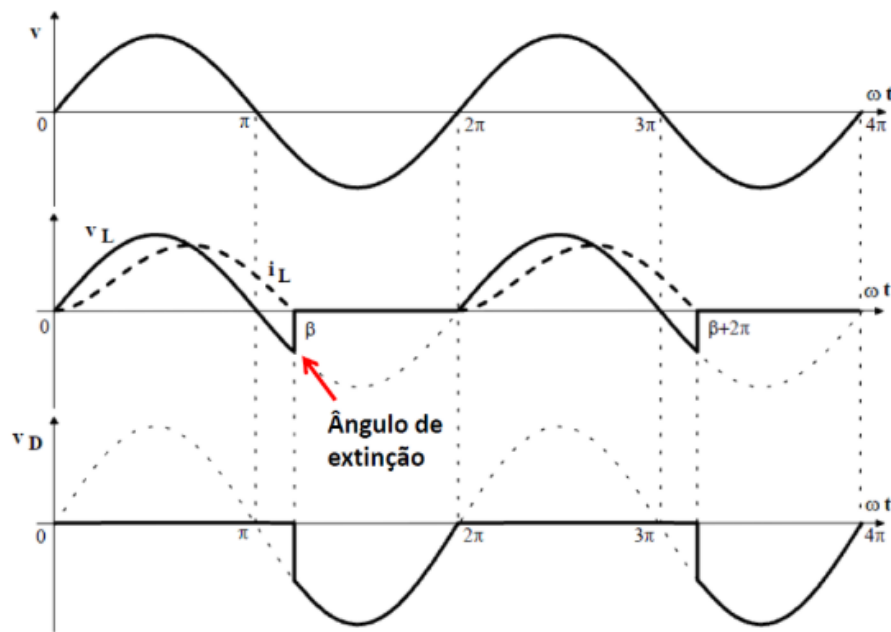


Figura 2: Tensão de entrada, tensão e corrente na carga e tensão no diodo, respetivamente

O ângulo β pode ser aproximado pelo seguinte cálculo: $\beta = 180^\circ + \theta$
 Onde $\theta = \arctan(\frac{\omega L}{R})$

1.1 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL E COM DIODO DE RODA-LIVRE

O circuito a ser estudado encontra-se abaixo (figura 8). Seu funcionamento é muito parecido com o circuito anterior. A diferença é que nele podemos perceber um diodo em paralelo com a carga. Este diodo serve, por exemplo, para proteger circuitos dos picos gerados por indutores no caso de alta variação da corrente (ligar/desligar o sistema). Com este diodo em paralelo com o indutor e um resistor para dissipação, a alta tensão gerada pelo indutor vai para o diodo que conduz a corrente de pico gerada e é dissipada no resistor.

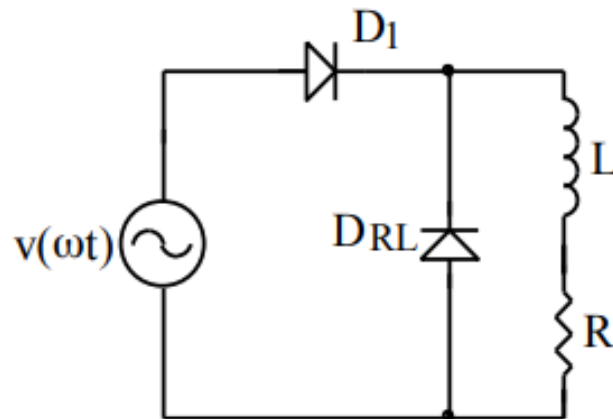


Figura 3: Retificador de meia onda com diodo de roda livre

Quando a tensão na fonte for positiva, sabemos que o diodo 1 (D_1) irá se polarizar e conduzir, e o diodo 2 (D_2) não irá conduzir. E irá funcionar como na figura 3.

Quando a tensão na fonte for negativa, sabemos que o diodo 1 (D_1) não irá conduzir, e o diodo 2 (D_2) irá conduzir. Assim funcionando como na figura 4 e 5.

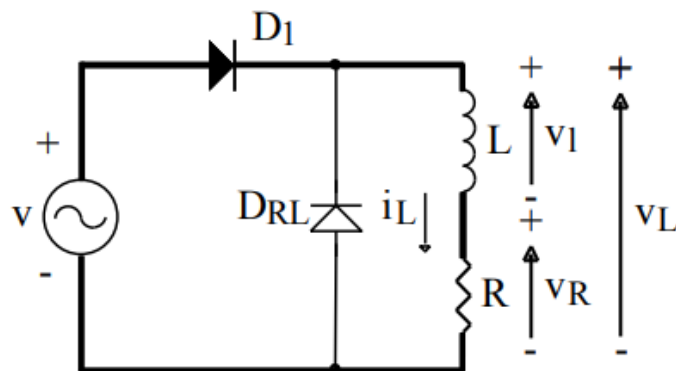


Figura 4: Primeiro estágio de condução

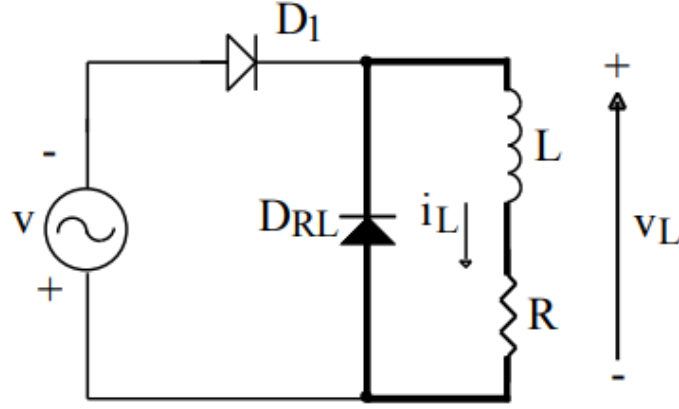


Figura 5: Segundo estágio de condução

2 TEORIA

Esta seção pretende detalhar o equacionamento dos dos circuitos analisados.

2.1 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL

Para analisar este circuito descrito na figura 1, dividimos em 2 etapas, com o diodo conduzindo e com o diodo em aberto. O diodo começa a conduzir com a tensão positiva (iremos considerar um diodo ideal) e para de conduzir com corrente negativa. Assim a equação para a primeira parte, aplicando lei das malhas e assumindo entrada senoidal, fica:

$$V_p \sin(\omega t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$\begin{aligned} V_p \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} &= RI(s) + L(sI(s) - i(0)) \\ V_p \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + Li(0) &= I(s)(R + sL) \\ I(s) &= V_p \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{(R + sL)} + \frac{Li(0)}{(R + sL)} \\ I(s) &= \frac{V_p \omega}{L} \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{\left(\frac{R}{L} + s\right)} \right) + \frac{i(0)}{\left(\frac{R}{L} + s\right)} \end{aligned}$$

Como:

$$\frac{1}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{\left(\frac{R}{L} + s\right)} \Longleftrightarrow \frac{e^{-\frac{tR}{L}}}{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \omega^2} + \frac{\sin(\omega t - \phi)}{\omega \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \omega^2}}$$

$$i(t) = \frac{V_p \omega}{L} \left(\frac{e^{-\frac{tR}{L}}}{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \omega^2} + \frac{\sin(\omega t - \phi)}{\omega \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \omega^2}} \right) + i(0) e^{-\frac{tR}{L}} \quad (2)$$

Enquanto a corrente for positiva, ela segue este padrão de corrente ditado pela equação acima. Para a segunda parte, quando a corrente $i(t)$ for igual a zero, como a tensão é negativa, o diodo abre e a corrente fica zero até a tensão ficar positiva novamente, como mostrado no gráfico abaixo. O gráfico foi traçado assumindo os mesmos dados utilizados no nosso experimento.

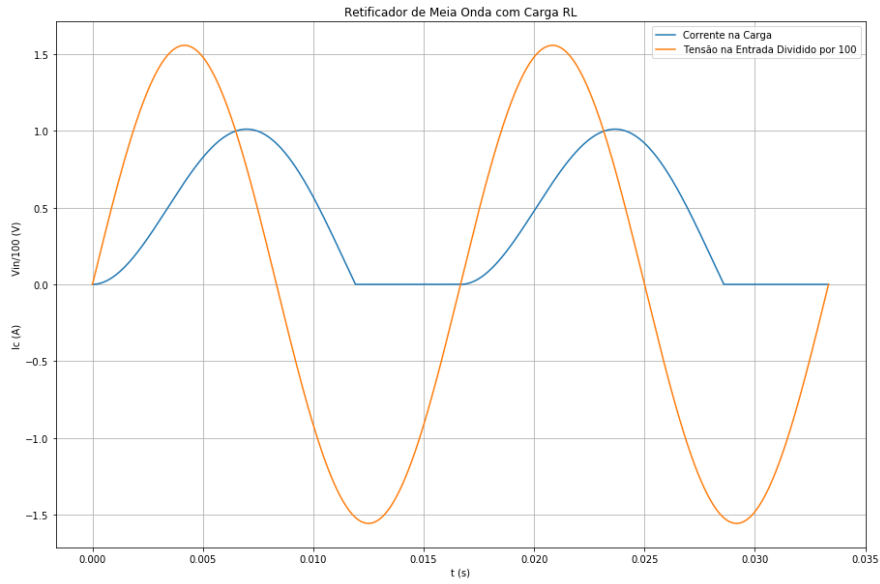


Figura 6: Circuito Sem Diodo de Roda Livre

2.2 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL E DIODO DE RODA LIVRE

Para analisar este circuito descrito na figura 3, dividimos em 2 etapas novamente, com o diodo D_1 conduzindo e em aberto. Assim como já discutido anteriormente, o diodo começa a conduzir com a tensão positiva (iremos considerar um diodo ideal) e para de conduzir com corrente negativa. Na primeira etapa o diodo D_1 está conduzindo e o diodo D_{RL} está em aberto, assim o circuito e as equações são equivalentes aquelas vistas anteriormente, resultando na equação (2).

Quando a tensão inverte a polaridade, o diodo D_{RL} passa a conduzir e o diodo D_1 abre. Assim temos um circuito como o da figura 5. Neste caso, aplicando a lei das malhas, a equação do circuito fica:

$$0 = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$0 = RI(s) + L(sI(s) - i(0))$$

$$Li(0) = I(s)(R + sL)$$

$$I(s) = \frac{Li(0)}{(R + sL)}$$

$$I(s) = \frac{i(0)}{\left(\frac{R}{L} + s\right)}$$

$$i(t) = i(0)e^{-\frac{tR}{L}} \quad (4)$$

Devido a constante de tempo alta, o indutor no caso do nosso experimento não descarrega totalmente, assim a corrente $i(0)$ do circuito altera conforme vai passando os períodos, até que o circuito estabiliza em um regime permanente, assim como se pode observar no gráfico abaixo. O gráfico foi traçado assumindo os mesmos dados utilizados no nosso experimento.

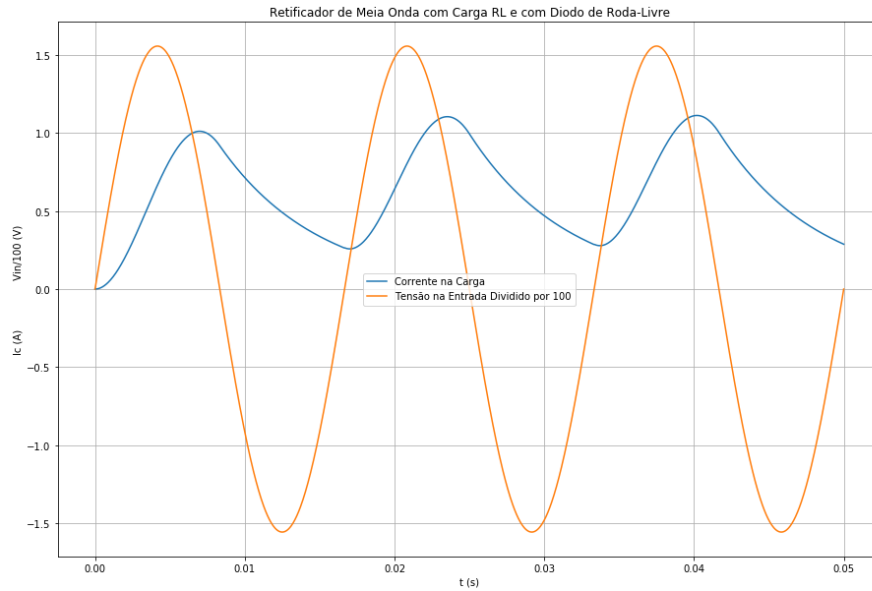


Figura 7: Circuito Sem Diodo de Roda Livre

3 SIMULAÇÕES

3.1 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL

Foi montado o seguinte circuito no PSIM 9:

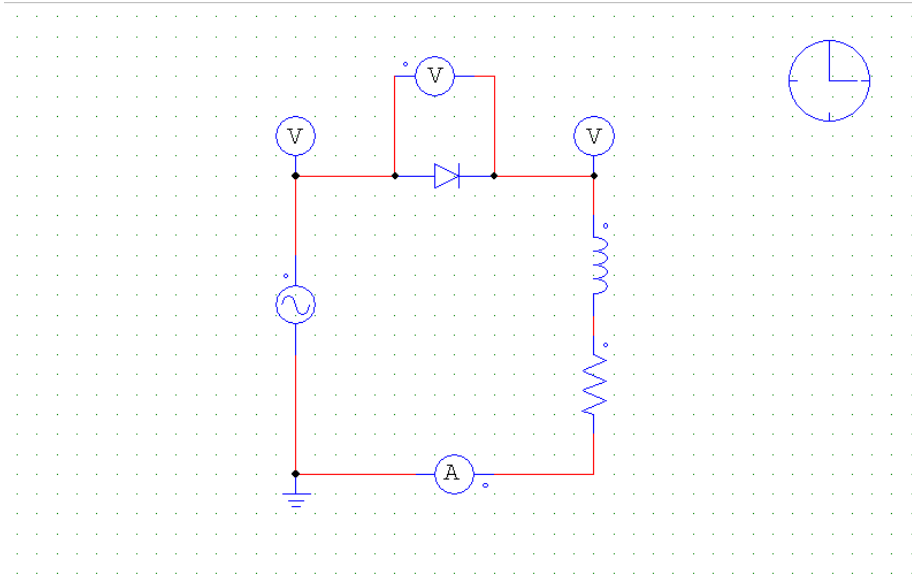


Figura 8: Circuito sem diodo de roda livre

Na simulação, foram utilizadas as características do diodo encontradas no experimento de retificador com carga resistiva, que no caso foram $r_d = 62.5m\Omega$ e $V_{to} = 700mV$. Além disso, foi utilizada indutância de $500mH$, resistência de 75Ω e tensão de entrada senoidal com $155V$ de pico, $60Hz$. Para essa simulação interessa as formas de onda da tensão de entrada e corrente no circuito. Para que essas formas de onda fiquem no mesmo gráfico, multiplicou-se a corrente no circuito por um fator 100. O resultado pode ser visto na figura abaixo (tensão de entrada em azul e corrente no circuito em vermelho):

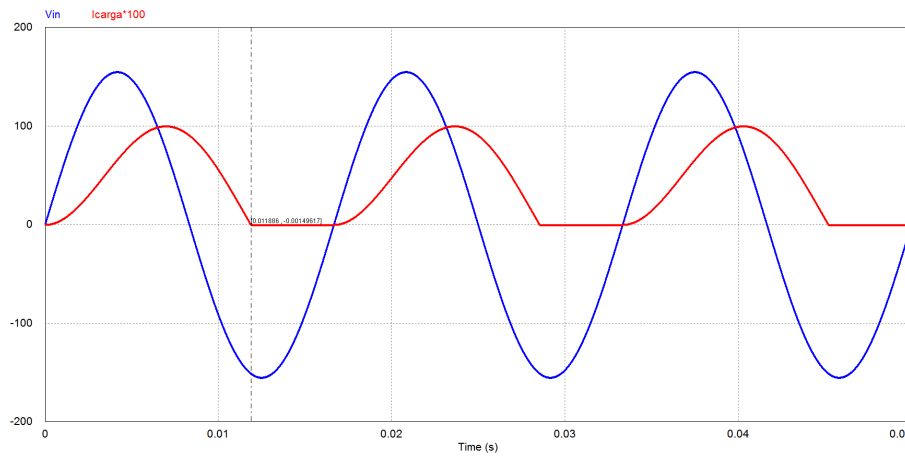


Figura 9: Tensão de entrada e corrente no circuito sem diodo de roda livre

Podemos ver pela simulação que o tempo que o diodo leva para parar de conduzir é de 11.886ms, o que se traduz num ângulo de extinção $\beta = 256,74^\circ$.

Foram analisadas também as potências ativa e aparente da fonte, bem como seu fator de potência, que pela simulação (removendo o fator 100 da corrente para a determinação desses valores neste caso), resultaram em:

$$P = 23,164W$$

$$S = 60,158VA$$

$$FP = 0,383$$

3.2 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL E COM DIODO DE RODA-LIVRE

Agora, utilizando dos mesmos componentes do circuito anterior, foi adicionado um diodo de roda livre à simulação, de tal maneira que o circuito resultante fica:

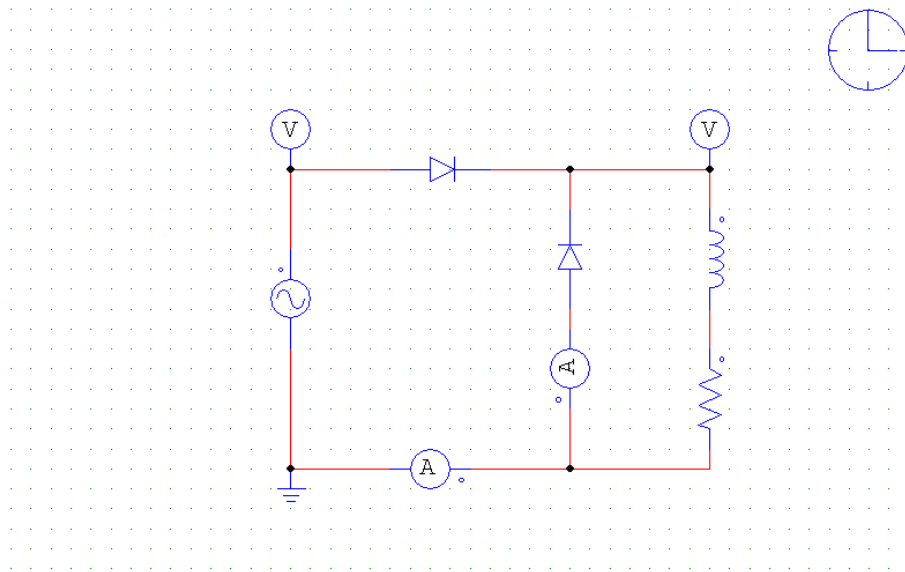


Figura 10: Circuito com diodo de roda livre

Nesse caso interessa além da tensão de entrada, a corrente no diodo 1 (retificador) e a corrente no diodo 2 (roda livre). Do mesmo jeito que o último circuito, interessa termos todas as formas de onda no mesmo gráfico, dessa maneira foram multiplicadas por um fator de 100 as corrente nos diodos. O resultado da simulação pode ser visto abaixo (tensão de entrada em azul, corrente no diodo retificador em vermelho e corrente no diodo de roda livre em laranja):

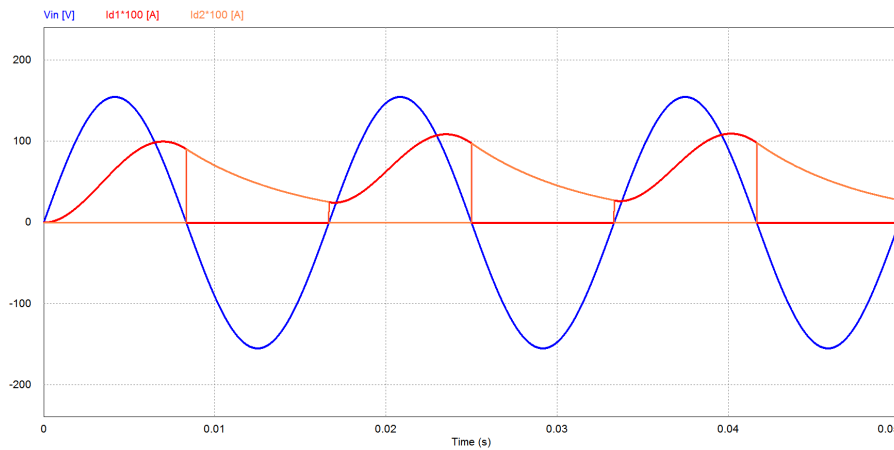


Figura 11: Tensão de entrada e correntes em ambos os diodos

Aqui, diferentemente do primeiro circuito, temos que quando entramos no semiciclo negativo da tensão de entrada, o retificador entra em bloqueio e o diodo de roda livre entra em condução (podemos ver a troca entre a curva vermelha e a laranja). Assim, o que "sobrou" de corrente no indutor (já que ela

não pode mudar graças a sua inércia no indutor) é descarregada através de um circuito RL.

Como a constante de tempo desse circuito RL é $L/R = 6.667\text{ms}$, temos que ele não consegue descarregar o que sobrou de corrente no indutor ao longo de meio período. Se isso fosse acontecer, aproximadamente 5x a constante de tempo do RL (quase total descarga) deveria ser menor que metade do período da tensão de entrada (onde não há nenhuma influência da tensão de entrada). Para esse caso, temos que a constante de tempo do RL deveria ser no máximo: $T/10 = 1.667\text{ms}$. Como isso não é verdade, temos que o circuito entra em modo de condução contínua e assim, depois de atingir o regime permanente periódico a corrente na carga é sempre maior que 0.

Isso pode ser observado no gráfico, já que a soma das correntes no diodo tem que ser igual a corrente na carga pela lei dos nós. Logo, a onda resultante entre a vermelha e a laranja está sempre acima de 0 e representa a corrente da carga.

Aqui foram obtidas também as potências aparente e ativa na fonte de entrada, juntamente com seu fator de potência. Que resultou em:

$$P = 34,989W$$

$$S = 58,932VA$$

$$FP = 0,594$$

Já era esperado um aumento no fator de potência por conta da carga estar conduzindo por todo o período ao invés de até um ângulo $\beta < 2\pi$ e os resultados da simulação comprovam isso.

4 EXPERIMENTO

4.1 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL

Montamos o circuito com: $V_{in} = 110 V_{rms}$, $R = 75\Omega$ e $L = 500\text{mH}$. Medimos a tensão média na carga RL ($V_{medcarga}$), a potência ativa na fonte (P), a tensão efetiva (V_{rms}) e a corrente efetiva (I_{rms}) na fonte, a corrente média na carga ($I_{medcarga}$) e a partir desses valores calculamos a potência aparente (S) e o fator de potência da fonte. Calculamos o β também e medimos o tempo que leva para chegar nele.

$$V_{medcarga} = 34,6V$$

$$P = 21,8W$$

$$V_{rms} = 110V$$

$$I_{rms} = 583mA$$

$$I_{medcarga} = 493mA$$

$$S = 64,13VA$$

$$FP = P/S = 0,4091$$

$$\beta = 248,3^\circ$$

$$\Delta t = 11,8ms$$

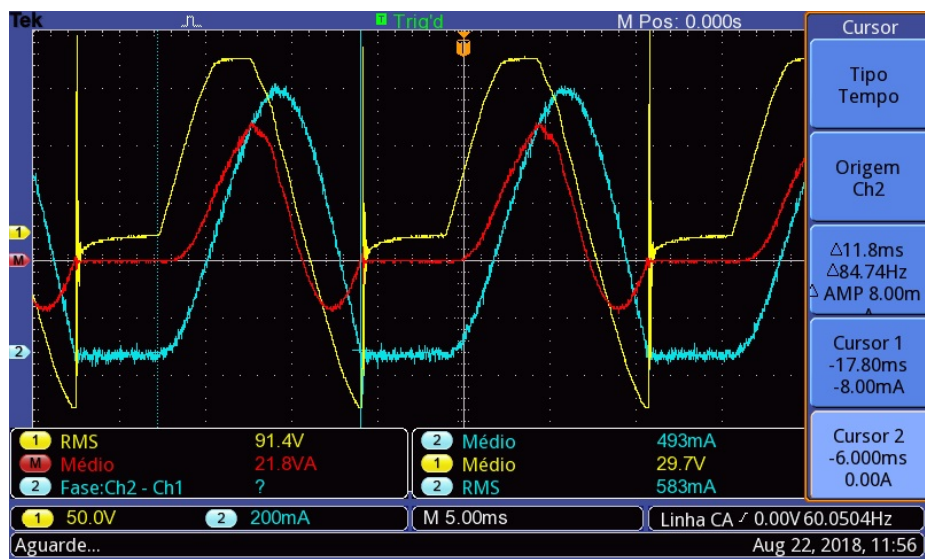


Figura 12: Tensão (amarelo), corrente(azul) e produto entre os dois (vermelho) na carga visto pelo osciloscópio

4.2 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL E COM DIODO DE RODA-LIVRE

Podemos analisar os resultados obtidos no osciloscópio nas imagens a seguir.

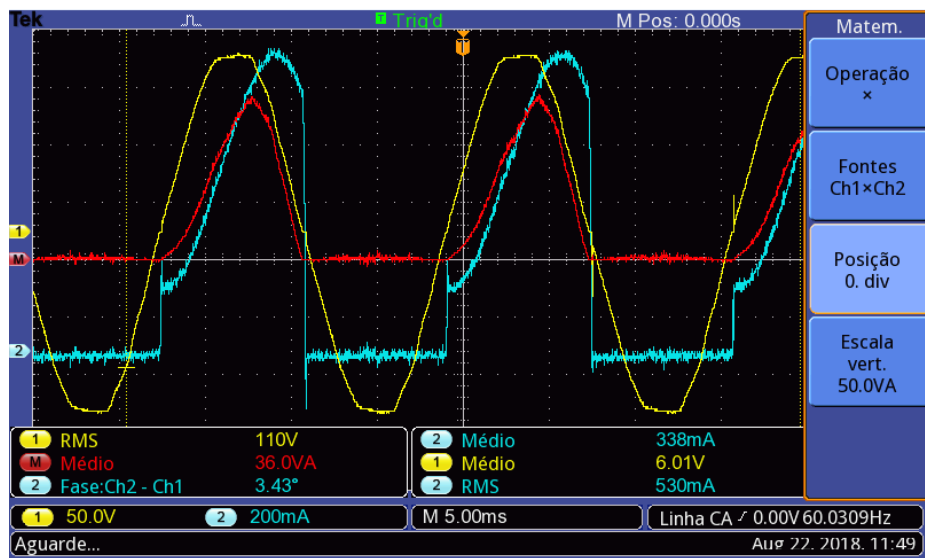


Figura 13: Tensão e corrente de entrada(amarelo e azul) e o produto entre eles(vermelho) visto pelo osciloscópio

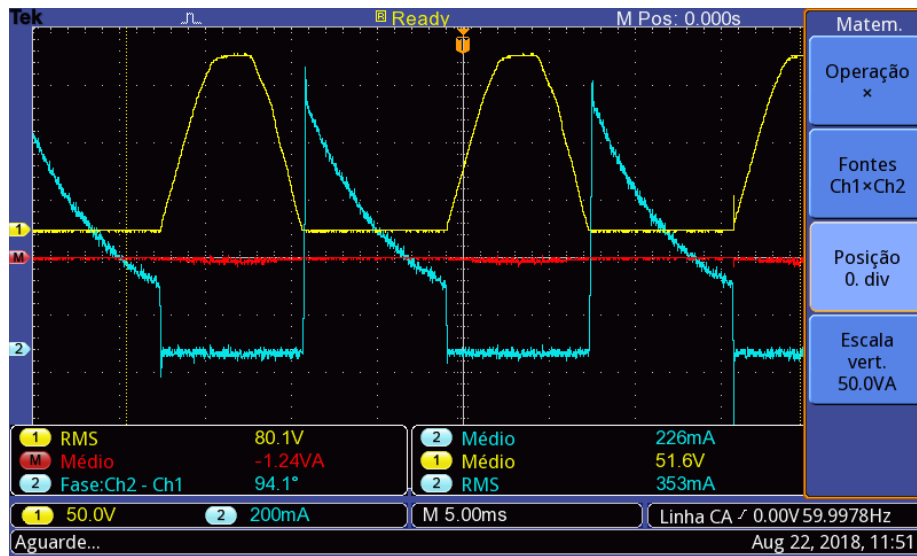


Figura 14: Tensão e corrente no diodo 2 (amarelo e azul) e o produto entre eles(vermelho) visto pelo osciloscópio

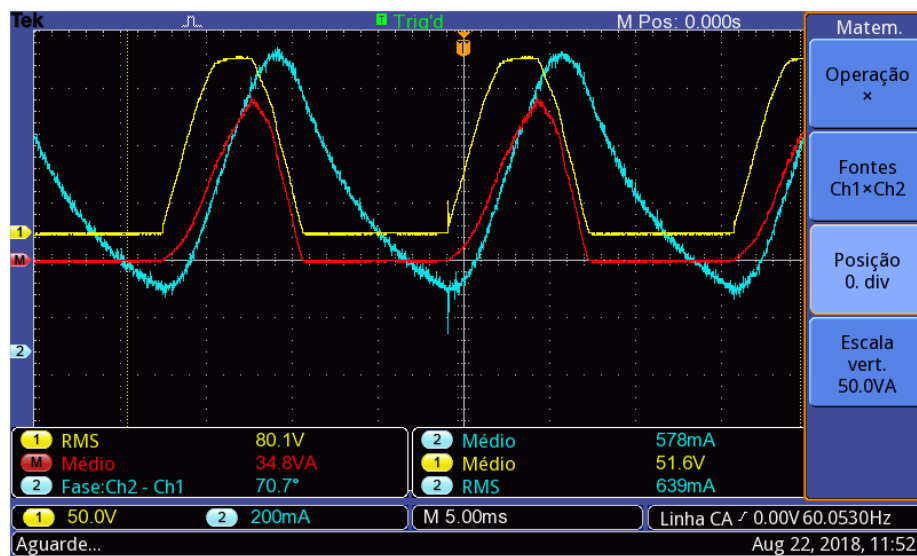


Figura 15: Tensão e corrente na carga (amarelo e azul) e o produto entre eles(vermelho) visto pelo osciloscópio

Montamos o circuito com: $v_{in} = 110 V_{rms}$, $R = 75\Omega$ e $L = 500mH$. Medimos a tensão média na carga RL ($V_{medcarga}$), a potência ativa na fonte (P), a tensão efetiva (V_{rms}) e a corrente efetiva (I_{rms}) na fonte, a corrente média na carga ($I_{medcarga}$) e a partir desses valores calculamos a potência aparente (S) e o fator de potência da fonte.

$$V_{medcarga} = 51,4V$$

$$P = 36W$$

$$V_{rms} = 110V$$

$$I_{rms} = 530mA$$

$$I_{medcarga} = 222mA$$

$$S = 58,3VA$$

$$FP = P/S = 0,617$$

5 Conclusão

No primeiro circuito, podemos observar que a corrente se comporta conforme o esperado. No entanto, tem uma pequena diferença na potência ativa do circuito e uma diferença maior na potência aparente, resultando numa diferença do fator de potência também. Possivelmente, isso ocorre em função da instabilidade da rede e das perdas no transformador. O β está com um valor bem próximo, mas era esperado que seu valor não fosse exato, visto que a fórmula utilizada é apenas uma aproximação.

Já no segundo circuito, os valores encontrados foram mais parecidos com os valores da simulação. Aparentemente, as variações encontradas anteriormente não afetaram tanto nessa montagem.