



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

ES563 - Laboratório de Máquinas Elétricas

**Relatório de Circuitos Retificadores Não Controláveis
e Controláveis**

Nome

Matheus G. A. Sasso
Iuri Mandello

RA

158257
170214

22 de maio de 2019

Sumário

1	Retificadores Não-Controlados	2
1.1	Retificadores de Meia Onda	2
1.1.1	Carga R	2
1.1.2	Carga RL	3
1.1.3	Carga RC	5
1.2	Retificadores de Onda Completa	8
1.2.1	Carga R	8
1.2.2	Carga RL	9
1.3	Carga RLE	11
1.4	Carga RC	12
2	Projeto do Retificador do Experimento	14
2.1	Carga Nominal x 50% da Carga	16
2.2	Variação da Tensão em +/- 10%	17
2.3	Soluções para proteger a tensão de saída contra variações na entrada	19
3	Retificadores Trifásicos	19
3.1	Carga R	20
3.2	Carga RL	22
3.3	Carga RC	25
4	Retificadores Controlados	27
4.1	Retificador de Meia Onda Controlado	27
4.2	Retificador de Onda Completa controlado	29
4.2.1	Carga R	29
4.2.2	Carga RL	31
4.2.3	Circuito RLE	34
5	Retificadores Trifásicos Controlados	36
5.1	Retificador de Meia Onda	36
5.1.1	Carga R	37
5.2	Retificadores de Onda Completa	39
5.2.1	Carga R	39
5.2.2	Carga RL	41
6	Referências Bibliográficas	43

1 Retificadores Não-Controlados

Para os experimentos serão considerados os seguintes valores:

- $V_s = 220$ (rms)
- $V_{\text{diodo}} = 0.7$ V
- $f = 60$ Hz
- $R = 100\ \Omega$
- $R = 30000\ M\Omega$ (simular circuito aberto par medições)
- $L = 1$ H
- $C = 100\ \mu\text{F}$
- $E = 10$ V

1.1 Retificadores de Meia Onda

1.1.1 Carga R

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

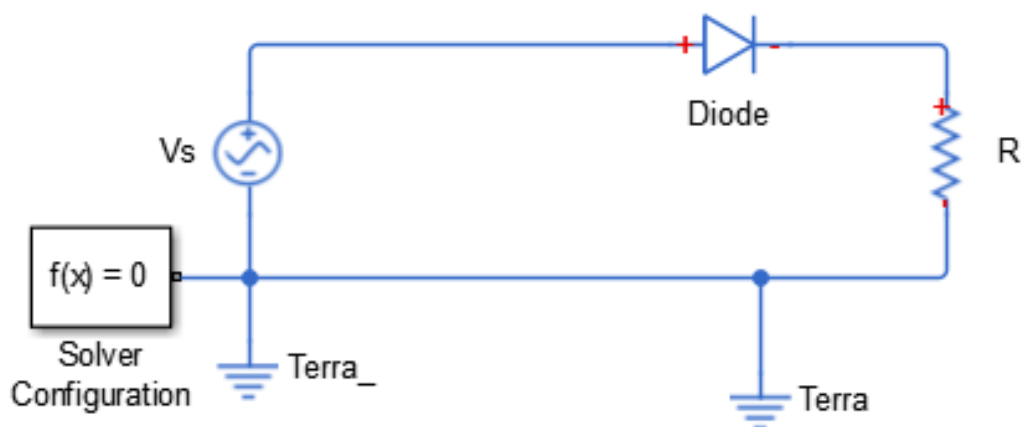


Figura 1: Circuito Retificador de Meia Onda Carga R.

Obtemos os gráficos de V_s , V_r , I e V_d que podem ser vistos na imagem a seguir:

Ensaio Circuito Retificador de Meia Onda

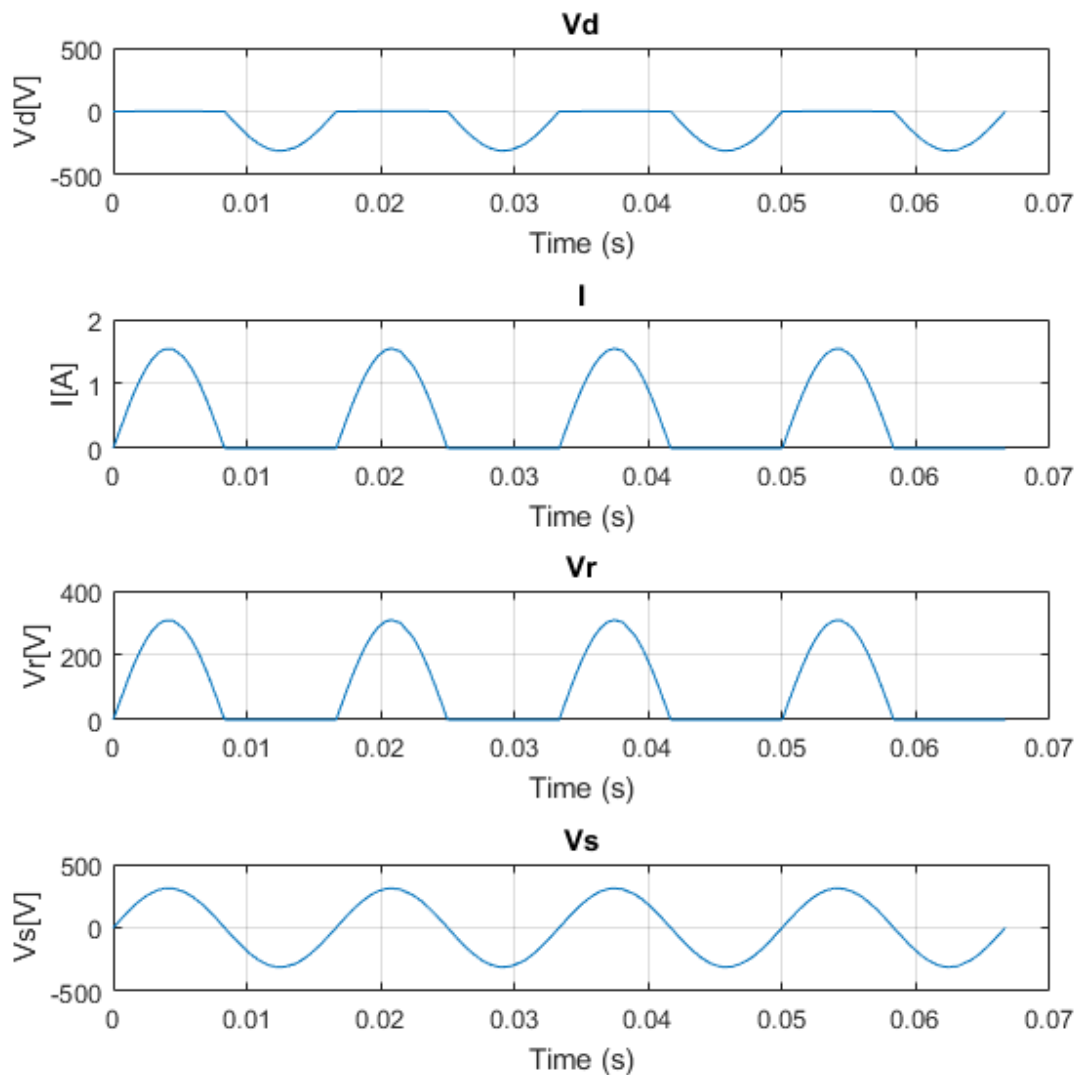


Figura 2: Tensões e correntes Circuito retificador de Meia Onda para Carga R.

Como pode ser observado o diodo encontra-se em polarização direta durante o ciclo positivo da fonte, permitindo a passagem de corrente, o que faz com que haja corrente e tensão no resistor.

Em contrapartida, durante o ciclo negativo, o diodo está bloqueado em polarização reversa, logo não há tensão e corrente no resistor.

1.1.2 Carga RL

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

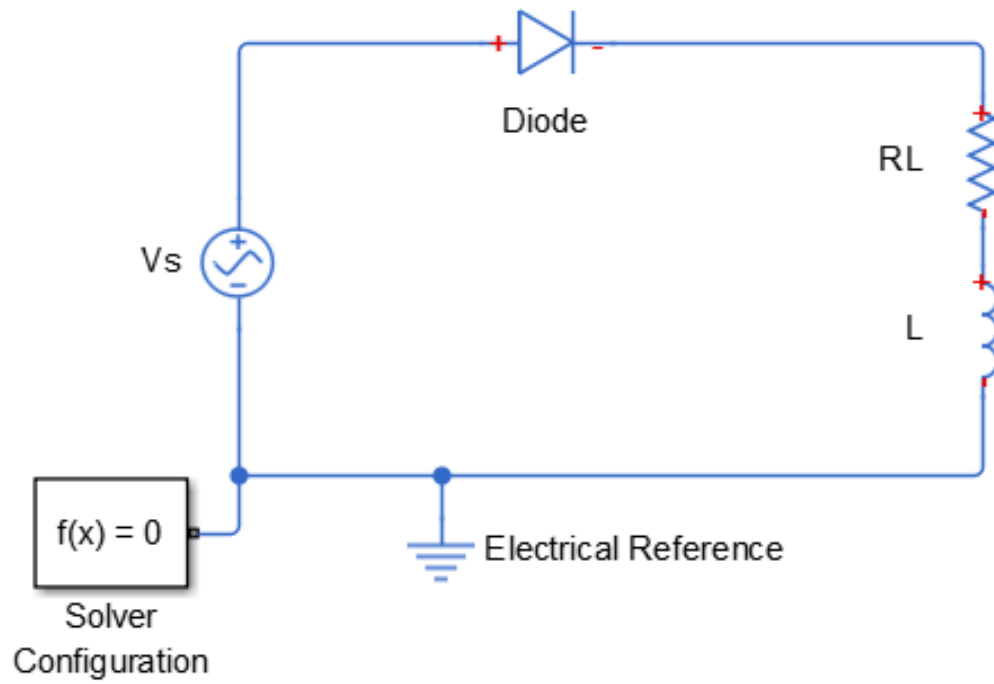


Figura 3: Circuito Retificador de Meia Onda Carga RL.

Deste circuito, extraímos a tensão no diodo V_d , corrente I , tensão no indutor V_L , tensão no resistor V_r e tensão na fonte V_s .

Ensaio Circuito Retificador de Meia Onda Carga RL

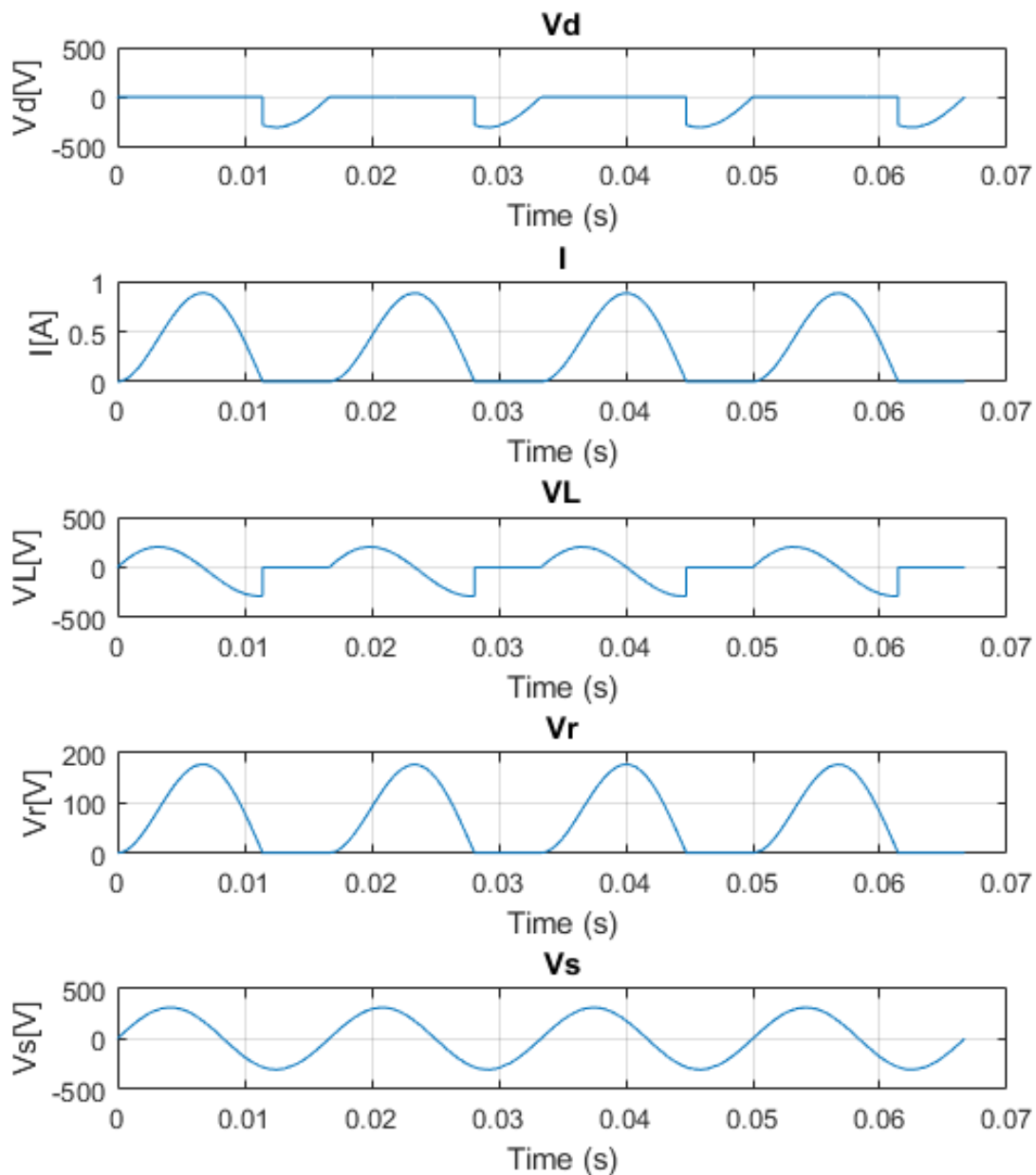


Figura 4: Tensões e correntes Circuito retificador de Meia Onda para Carga RL.

Pode-se observar que o diodo continua conduzindo mesmo após o ciclo positivo da tensão da fonte. Isso ocorre porque o indutor armazena corrente durante o ciclo positivo e por um certo tempo fornece corrente para o circuito durante o ciclo negativo, fazendo com que o diodo continue conduzindo por mais um tempo.

Entretanto, quando corrente termina, o diodo passa não mais conduzir, e espera o próximo ciclo positivo da fonte para conduzir novamente.

1.1.3 Carga RC

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

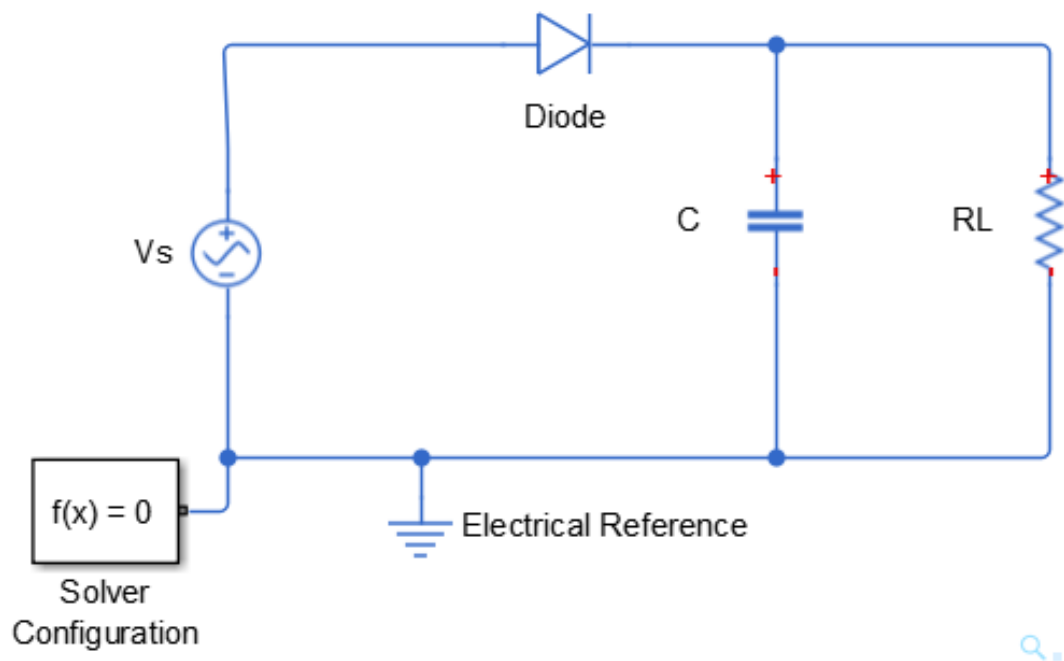


Figura 5: Circuito Retificador de Meia Onda Carga RC.

Deste circuito, extraímos a corrente no resistor I , a tensão no resistor V_r , a tensão da fonte V_s e a tensão no diodo V_d .

Ensaio Circuito Retificador de Meia Onda Carga RL

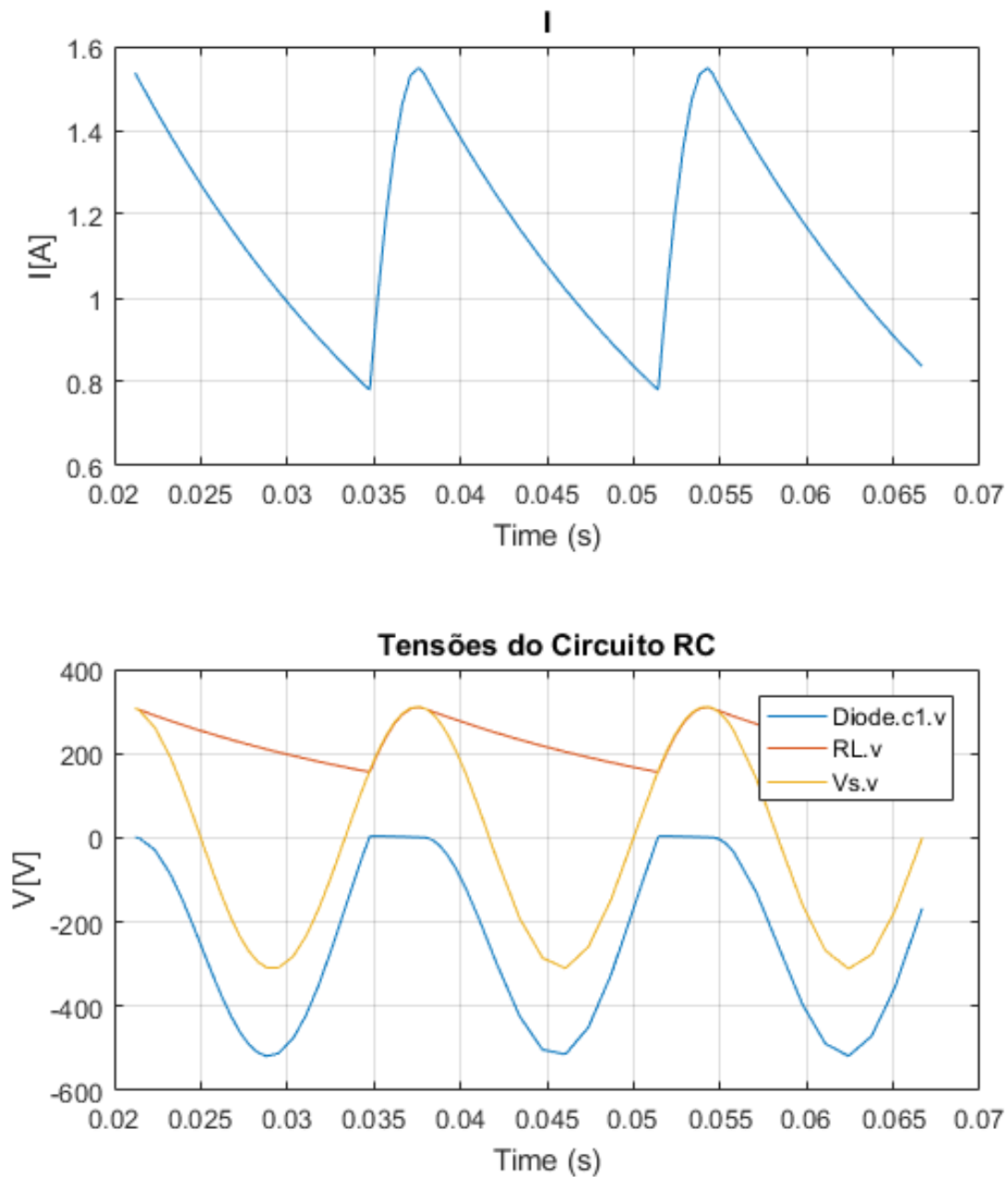


Figura 6: Tensões e correntes Circuito retificador de Meia Onda para Carga RC.

A principal função de um circuito retificador RC é ser um filtro de tensão através da chamada **Tensão de Ripple**.

Podemos observar que a tensão no resistor se torna mais próxima do contínuo visto que a mesma acompanha os picos de tensão da fonte, fazendo com que a tensão média de saída do retificador RC seja maior do que a tensão média de saída do retificador R. Isso acontece porque o capacitor armazenou tensão durante o período que a tensão da fonte estava nos valores máximos ($V_r > V_c$) e em seguida impediu que a tensão caísse bruscamente ($V_c > V_r$).

O diodo tem um pequeno período de condução, devido ao circuito formado com o capacitor como fonte, que condiz com o período em que V_r acompanha V_s .

1.2 Retificadores de Onda Completa

1.2.1 Carga R

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

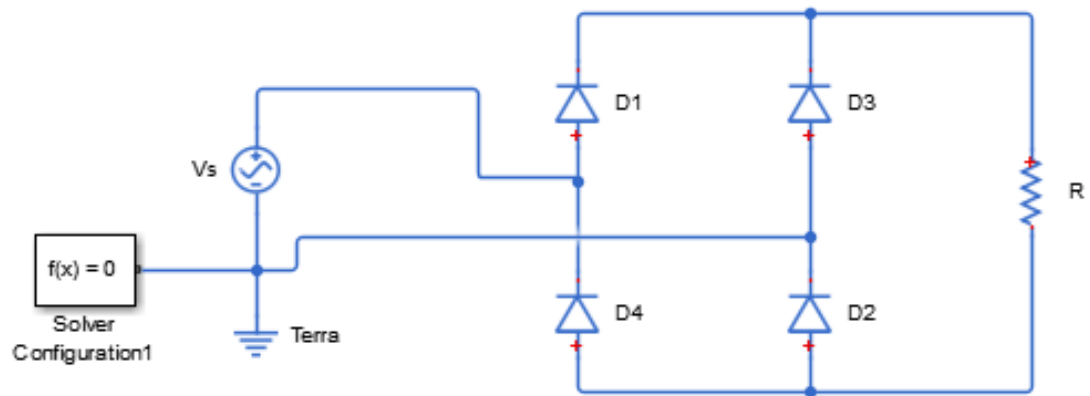


Figura 7: Circuito Retificador de Onda Completa Carga R.

Deste circuito, extraímos a corrente no resistor I , a tensão no resistor V_r , a tensão da fonte V_s e as tensões em V_{d1} e V_{d2} .

Ensaio Circuito Retificador de Onda Completa Carga R

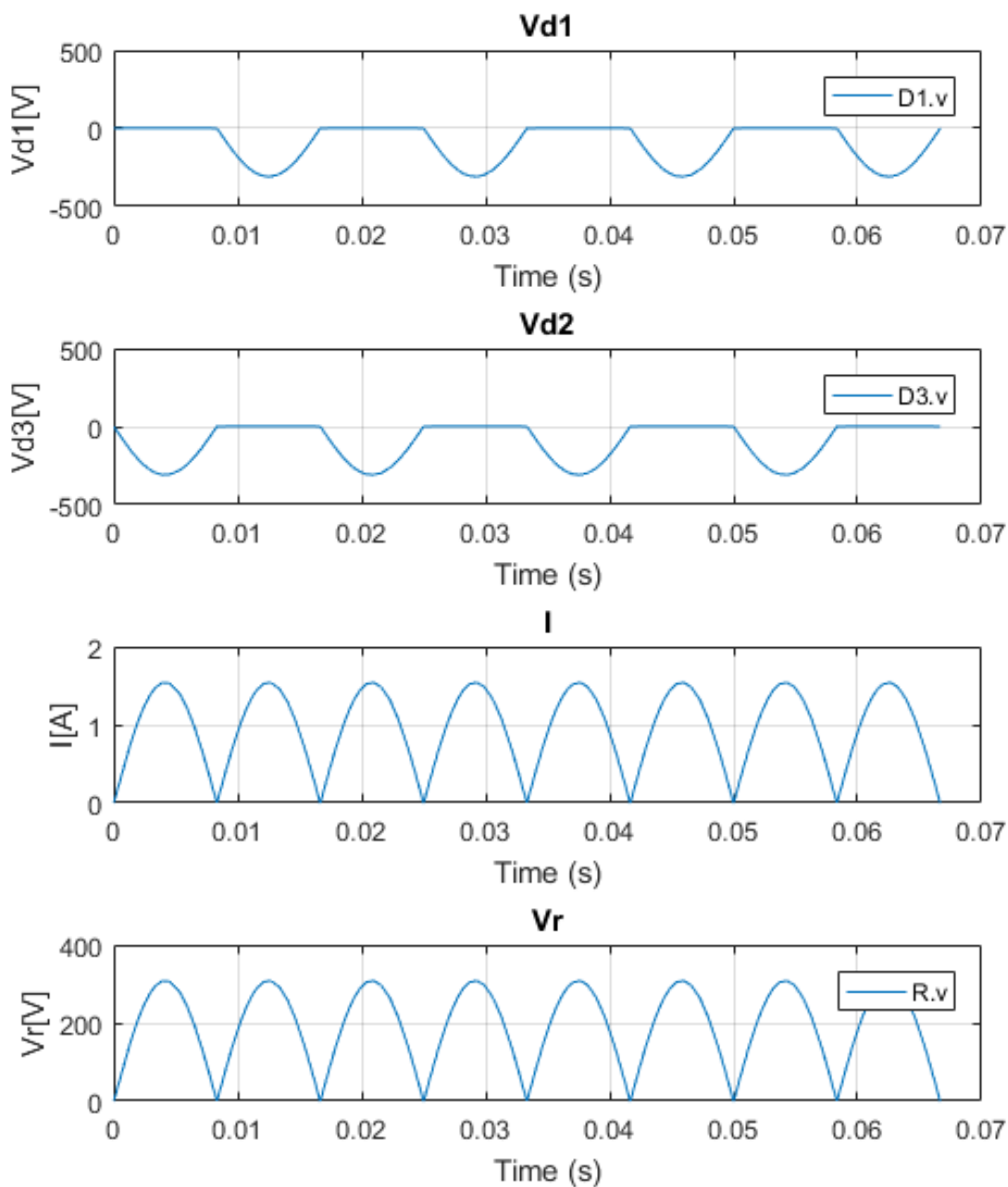


Figura 8: Tensões e Correntes Circuito retificador de Onda Completa para Carga R

Pode-se observar que há diodos polarizados diretamente tanto no ciclo positivo da fonte quanto no ciclo negativo. Por esta razão, a tensão e corrente no resistor é positiva no dois ciclos da fonte, fazendo com que a tensão esteja ainda mais próxima de uma tensão DC do que no retificador de meia onda.

1.2.2 Carga RL

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

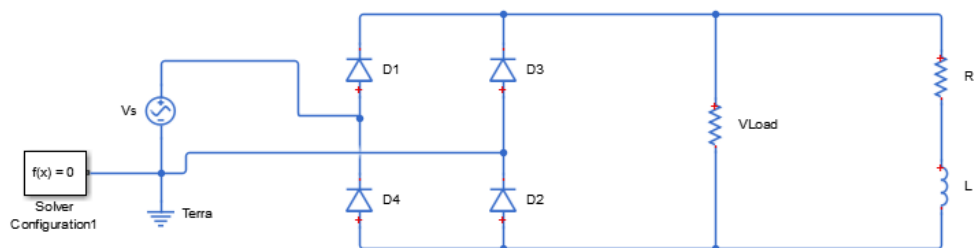


Figura 9: Circuito Retificador de Onda Completa Carga RL.

Deste circuito foi extraído a tensão no Resistor V_r , tensão na fonte V_s , V_{Load} (tensão na carga RL), corrente no resistor I , corrente no diodo1 (mesma corrente que a da fonte) I_{d1} , e corrente no diodo3 I_{d3} .

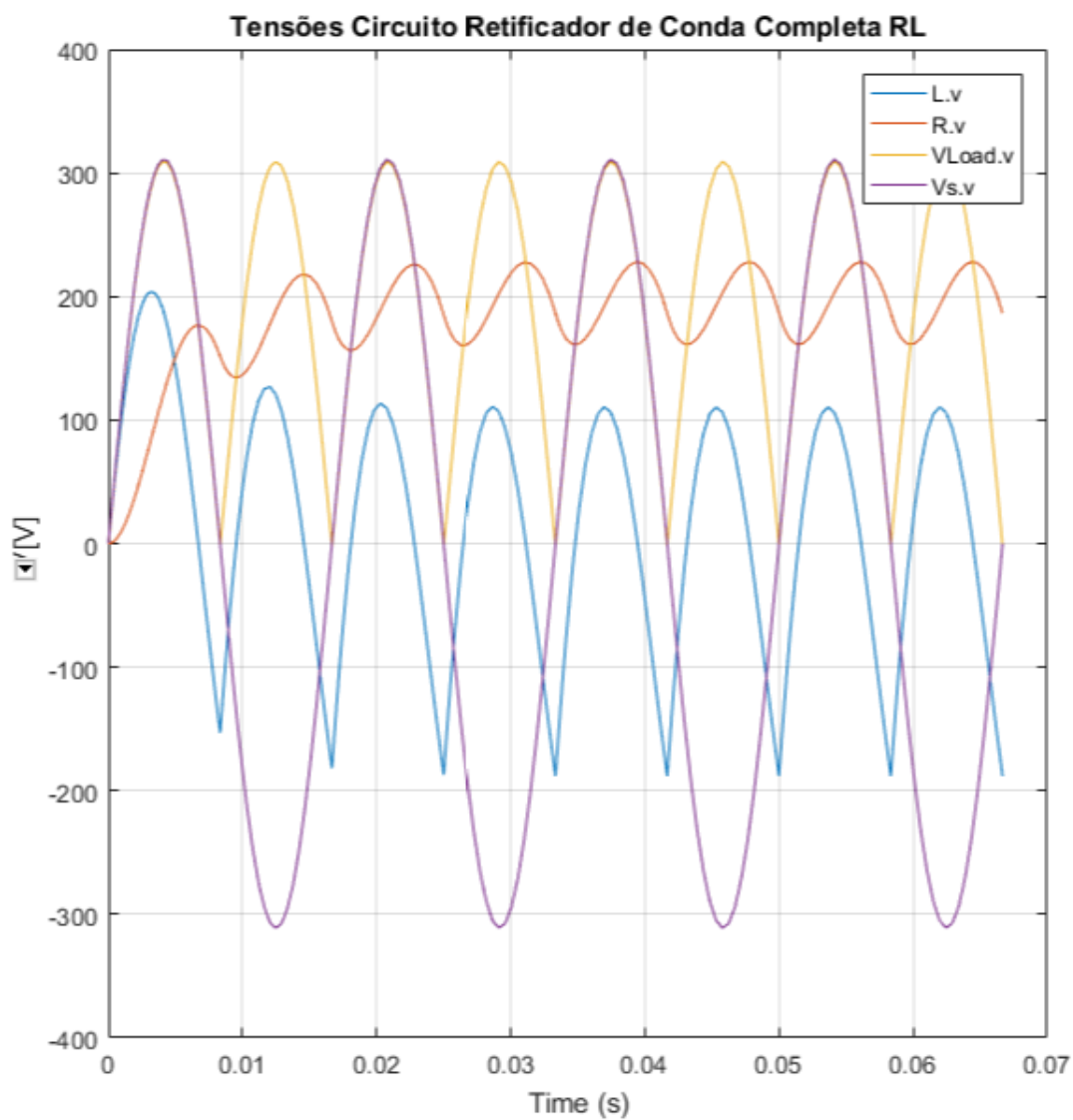


Figura 10: Tensões Circuito retificador de Meia Onda para Carga R

Correntes Retificado de Onda Completa Carga RL

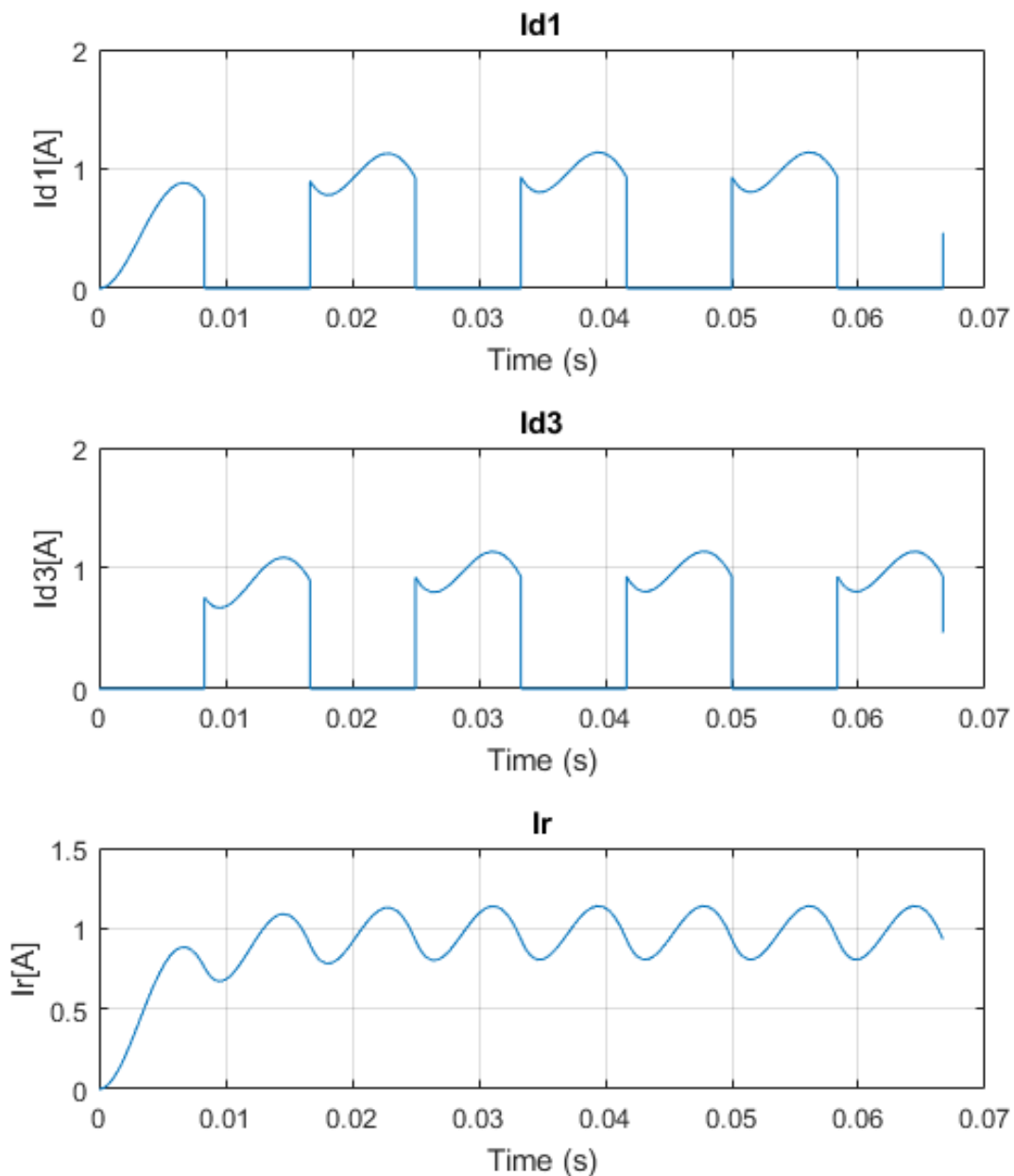


Figura 11: Correntes Circuito retificador de Onda Completa para Carga RL

Com relação a tensão, podemos observar que a tensão no indutor se torna negativa em todos os ciclos, pois no circuito retificador de onda completa com indutor sempre há corrente. Com isso V_{Load} foi retificada, apesar de a tensão média no resistor ter diminuído.

Com relação a corrente, podemos observar que cada diodo conduz corrente em um dos ciclos de tensão da fonte, fazendo com que a corrente no resistor e no indutor seja a sobreposição entre as duas. Para **indutâncias muito grandes**, a corrente em cada diodo, bem como a corrente no resistor tende a ficar com a forma **quadrada**.

1.3 Carga RLE

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

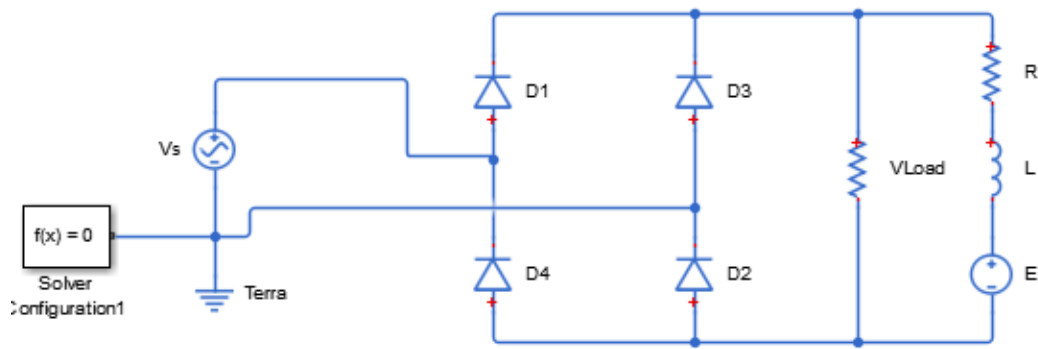


Figura 12: Circuito Retificador de Onda Completa Carga RLE.

Para entender melhor a função da fonte E no circuito em questão, podemos observar dois gráficos comparando a tensão no resistor para o circuito RL e o circuito RLE.

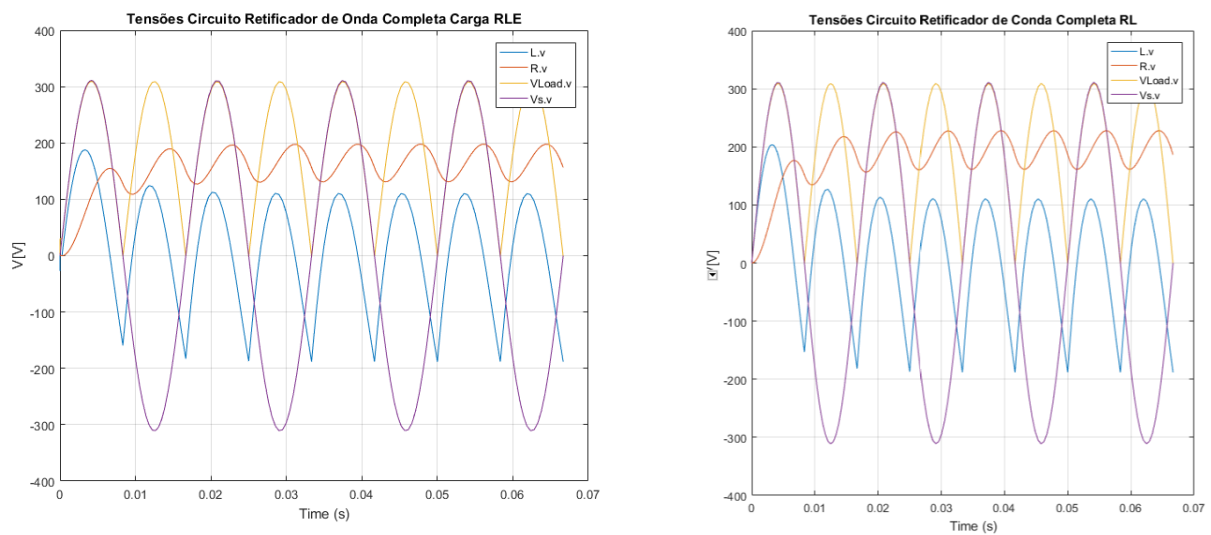


Figura 13: Comparativo Tensão para circuitos retificadores indutivos com e sem fonte DC

Através da comparação, é visto que para o retificador RLE a tensão no resistor está defasada de 30V em relação ao retificador RL, justamente devido ao consumo da fonte de tensão contínua E.

1.4 Carga RC

Pode-se observar o circuito modelado na plataforma Simulink através da biblioteca Simscape abaixo:

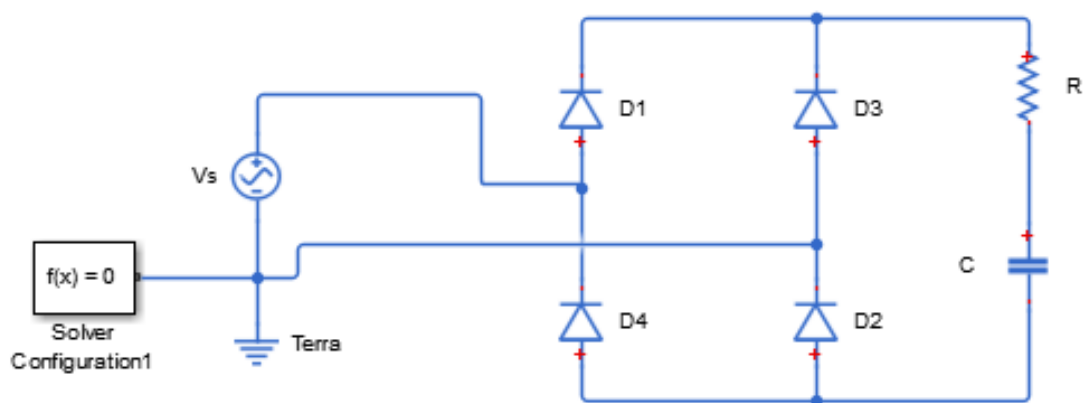


Figura 14: Circuito Retificador de Onda Completa Carga RC.

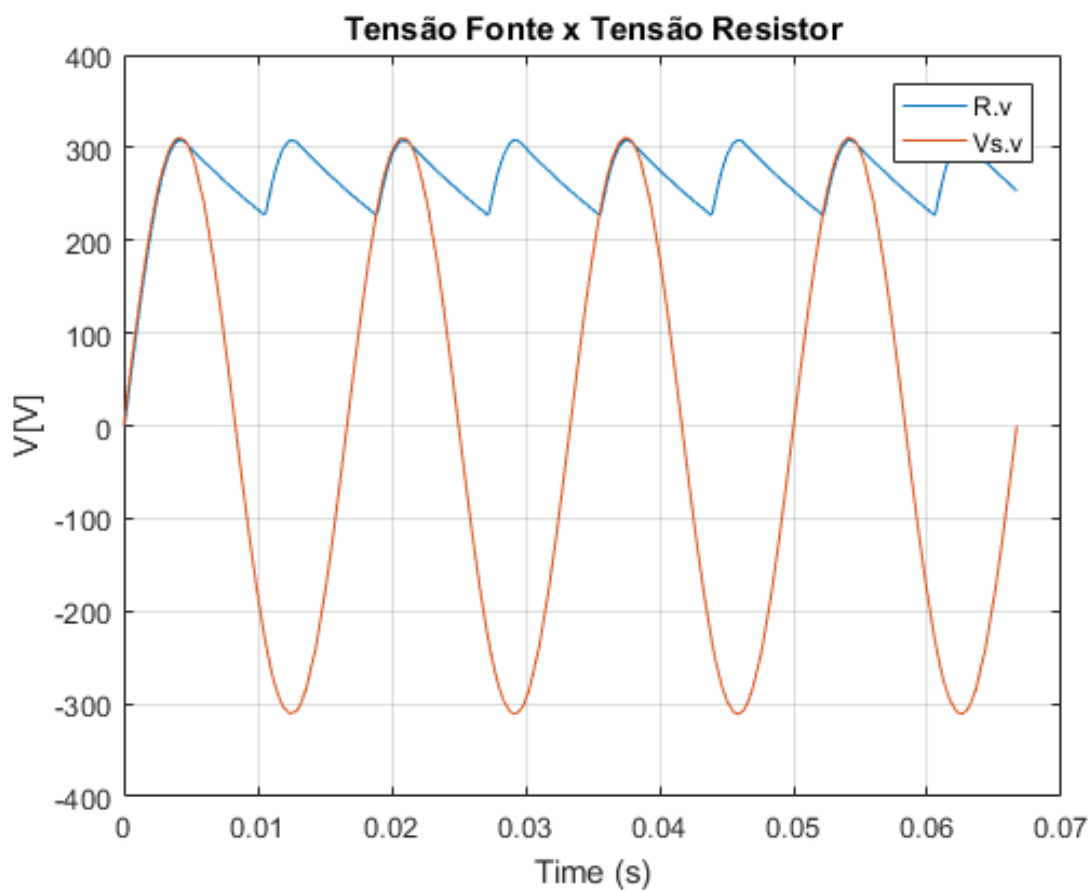


Figura 15: Tensões e correntes Circuito retificador de Meia Onda para Carga R

Extraímos do retificador a tensão no resistor V_r , tensão na fonte V_s , corrente nos diodos I_{d1} e I_{d3} .

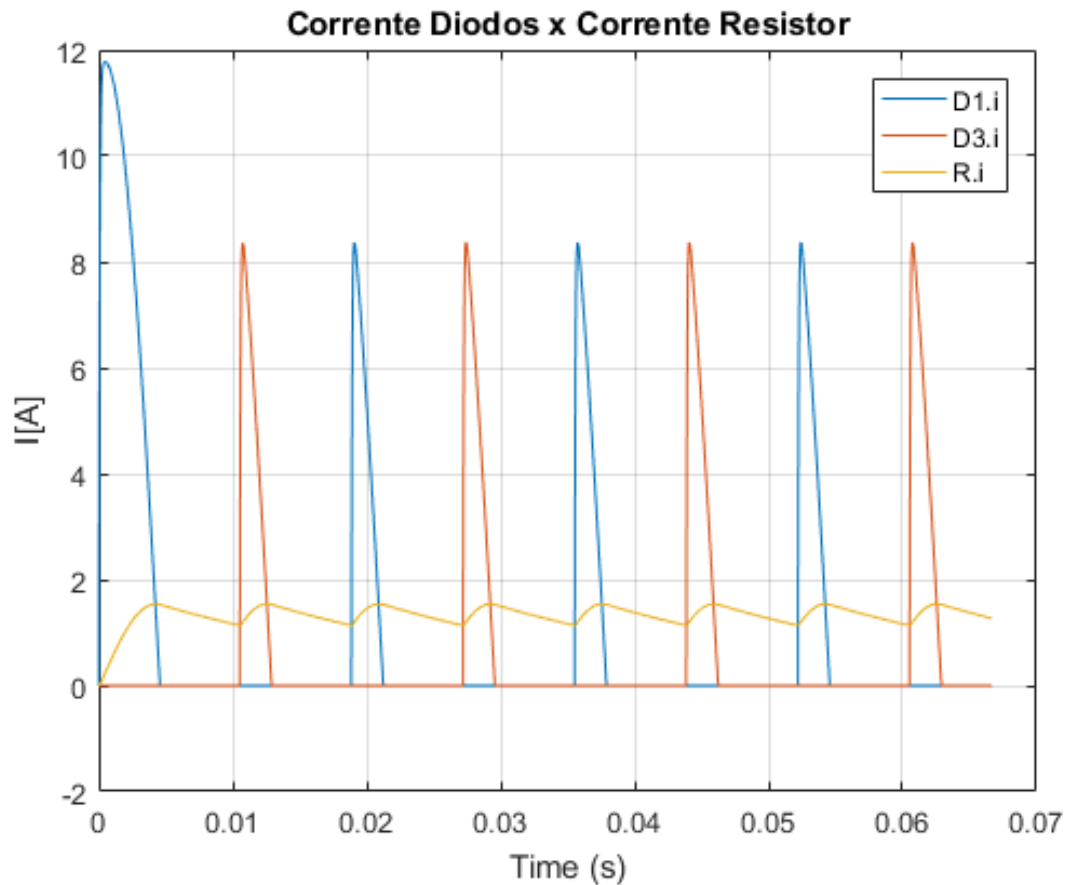


Figura 16: Tensões e correntes Circuito retificador de Meia Onda para Carga R

Com relação a tensão, é visto que há duas recuperações de tensão no resistor durante um ciclo, que correm quando $V_r > V_c$. Isso ocorre porque o resistor está sendo carregado durante o ciclo positivo e o negativo. Entretanto quando $V_c > V_r$ a tensão do capacitor é consumida.

Com relação as correntes, podemos observar justamente este carregamento, que ocorre apenas quando tensão na fonte é maior do que a tensão do capacitor. Quando não há tais picos, tensão do capacitor é consumida até o próximo pico.

2 Projeto do Retificador do Experimento

O circuito foi modelado no Simulink através do Simscape como na figura abaixo. Para modelagem do transformador, foram utilizados os parâmetros obtidos no ensaio com o transformador de 60VA da disciplina de laboratório de máquinas elétricas.

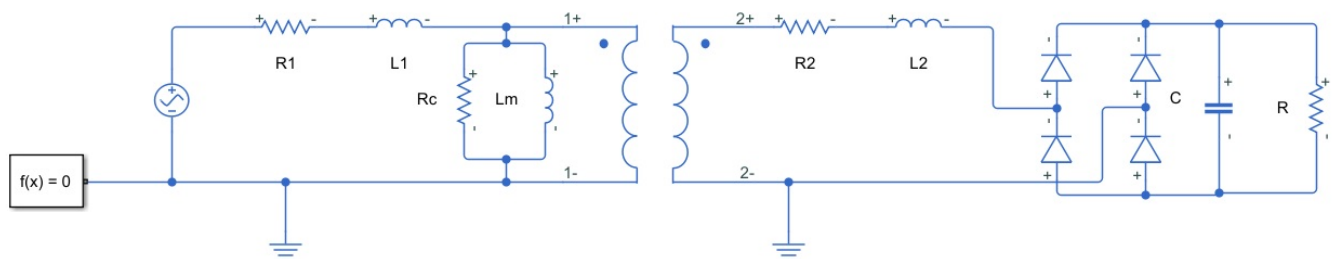


Figura 17: Circuito Retificador de Onda Completa com Transformador - Carga RC.

Para dimensionamento do capacitor utilizado, considerando o ripple de 5% temos que:

$$C = 20 / (f * R)$$

$$C = 160\mu F$$

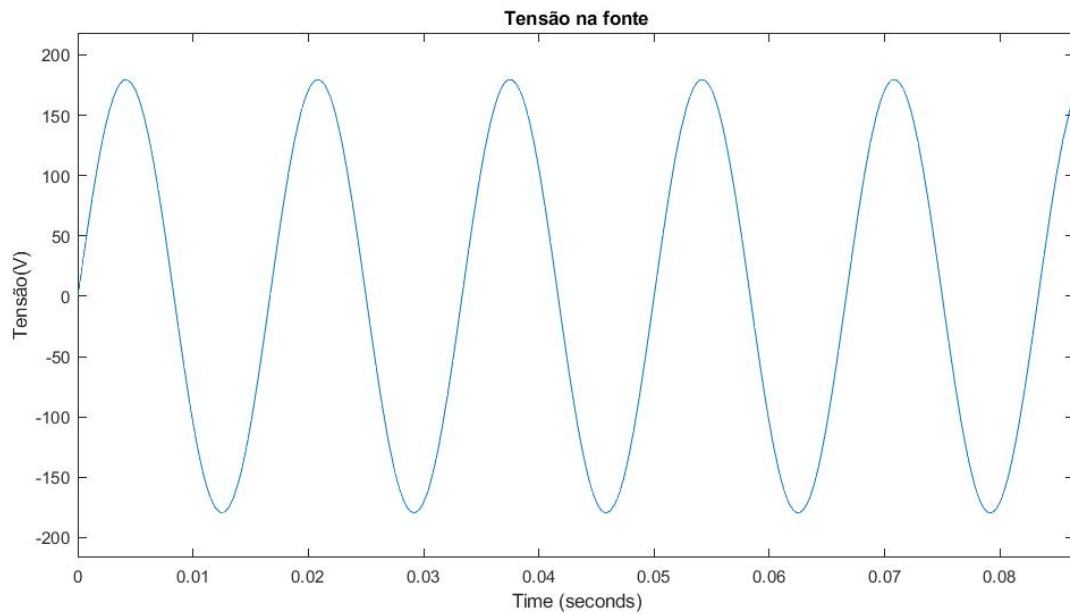


Figura 18: Tensão na fonte do transformador.

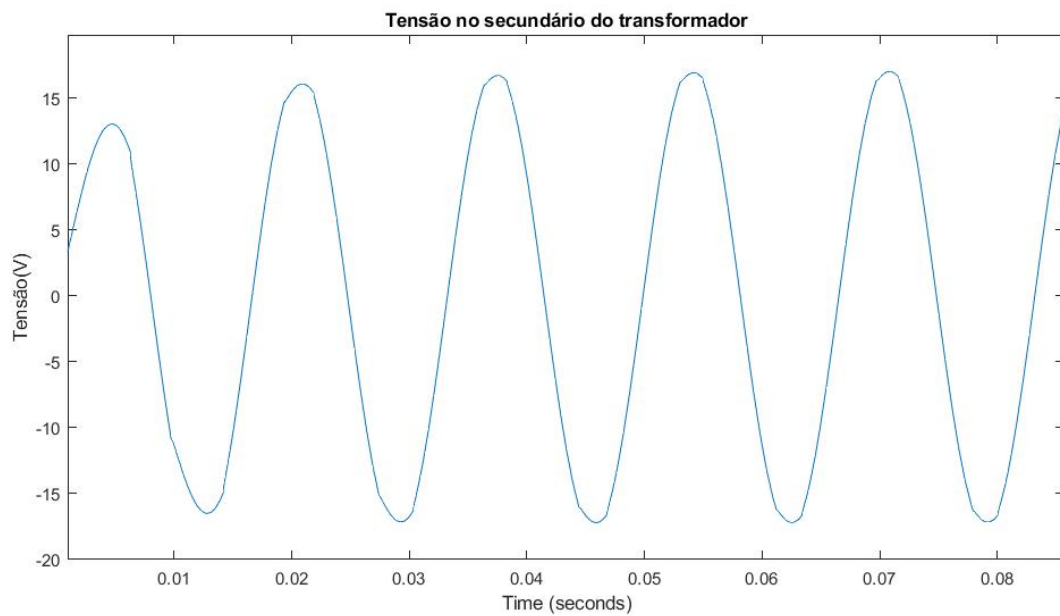


Figura 19: Tensão no secundário do transformador.

Podemos notar que a tensão no secundário do transformador é levemente distorcida devido às reatâncias de dispersão e magnetização.

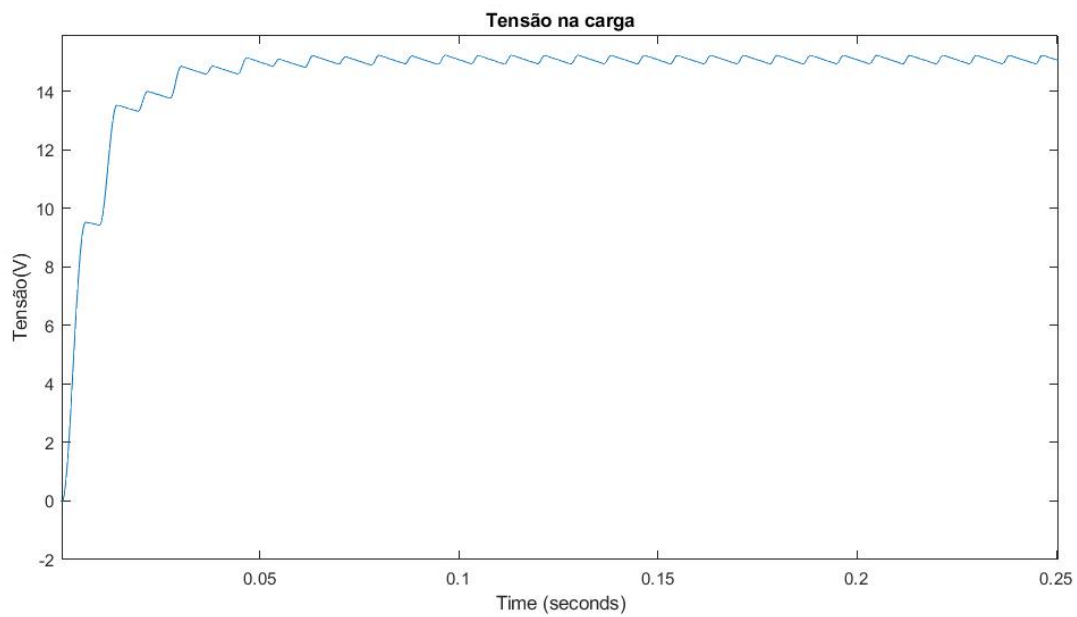


Figura 20: Tensão na carga.

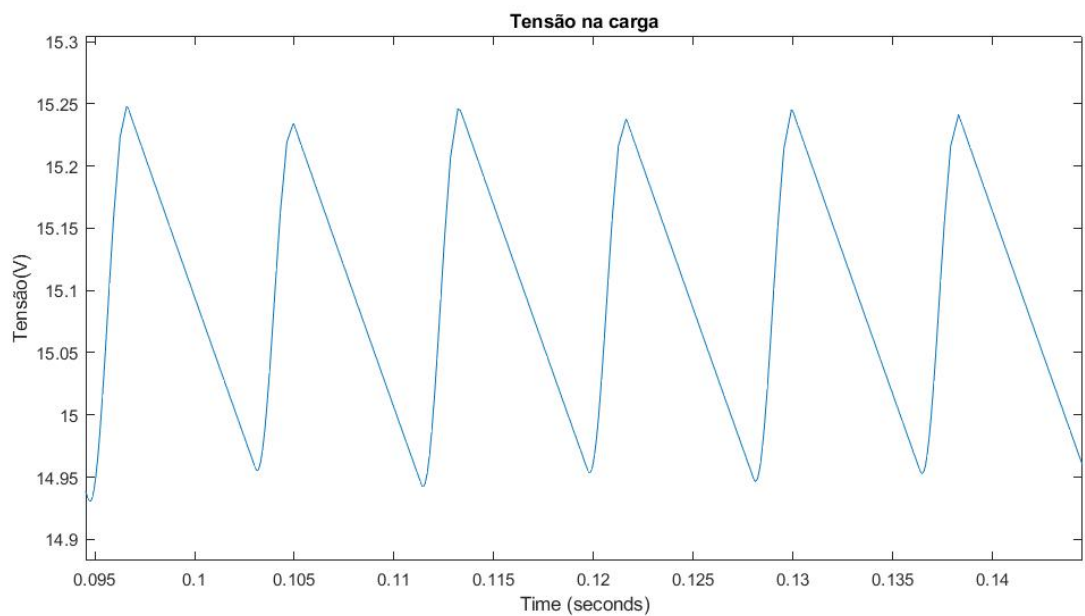


Figura 21: Tensão na carga.

Obtemos da imagem acima que o ripple resultante foi de aproximadamente 0,3V, diferente do projetado porém ainda abaixo do ripple máximo estipulado no projeto.

2.1 Carga Nominal x 50% da Carga

Realizando a simulação com metade da carga nominal, obtemos a seguinte tensão na carga:

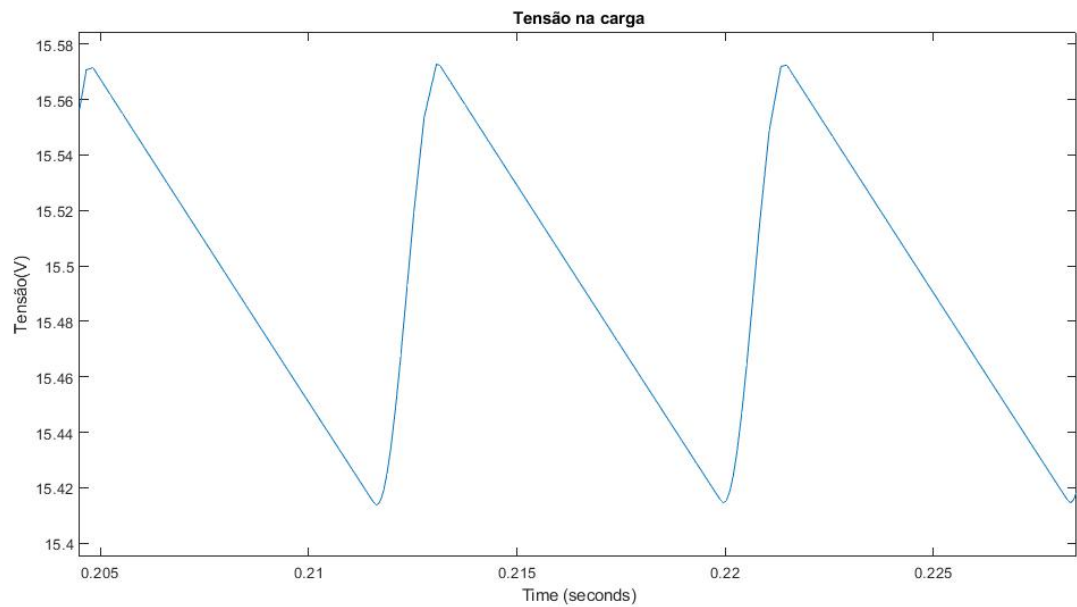


Figura 22: Tensão na carga utilizando metade da carga nominal.

Nessa nova configuração houve uma menor queda de tensão na saída do retificador e o ripple caiu para aproximadamente 0.16V.

2.2 Variação da Tensão em +/- 10%

Reduzindo 10% da tensão de entrada, obtemos os resultados:

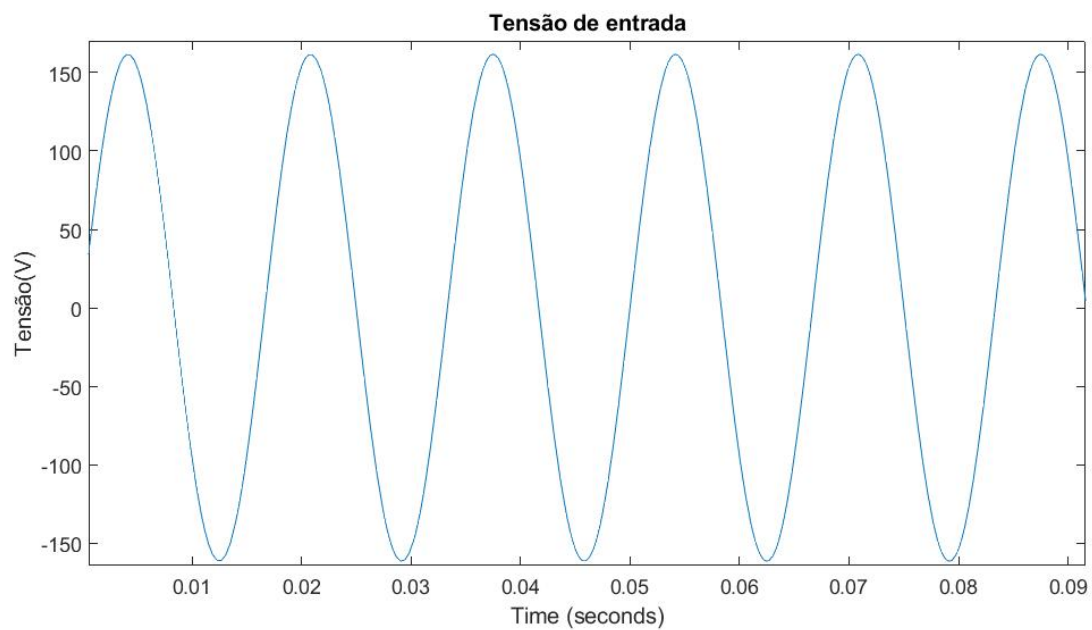


Figura 23: Tensão na fonte-.

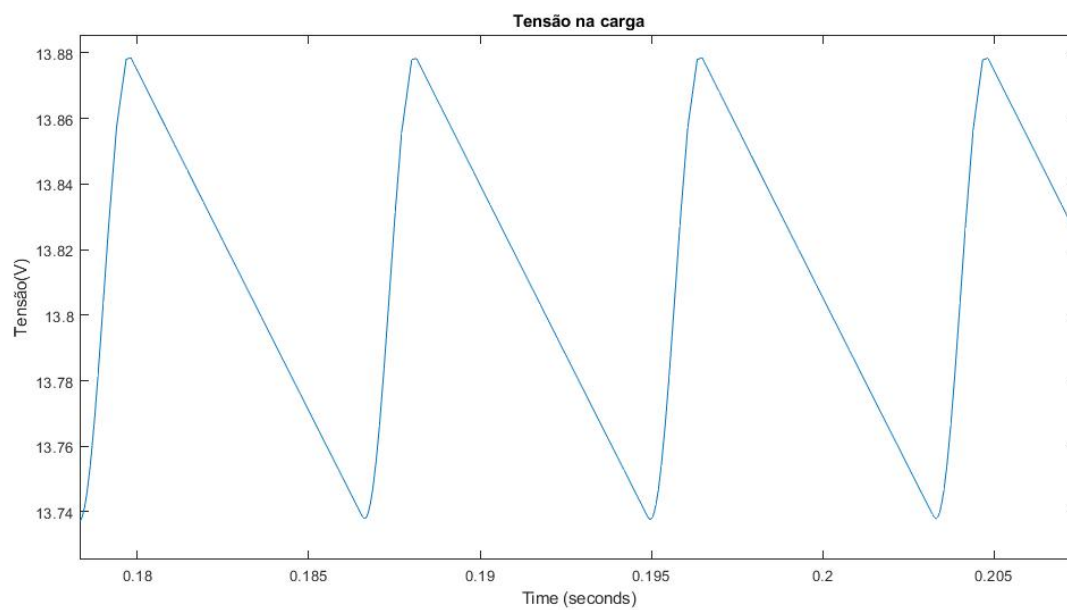


Figura 24: Tensão na carga.

Aumentando 10% da tensão de entrada:

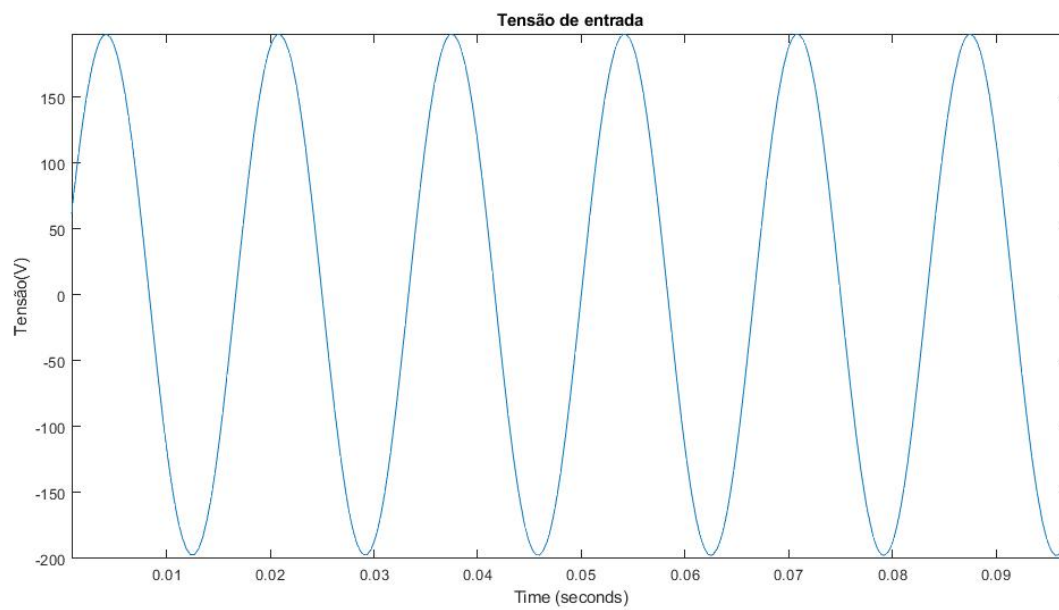


Figura 25: Tensão na fonte-.

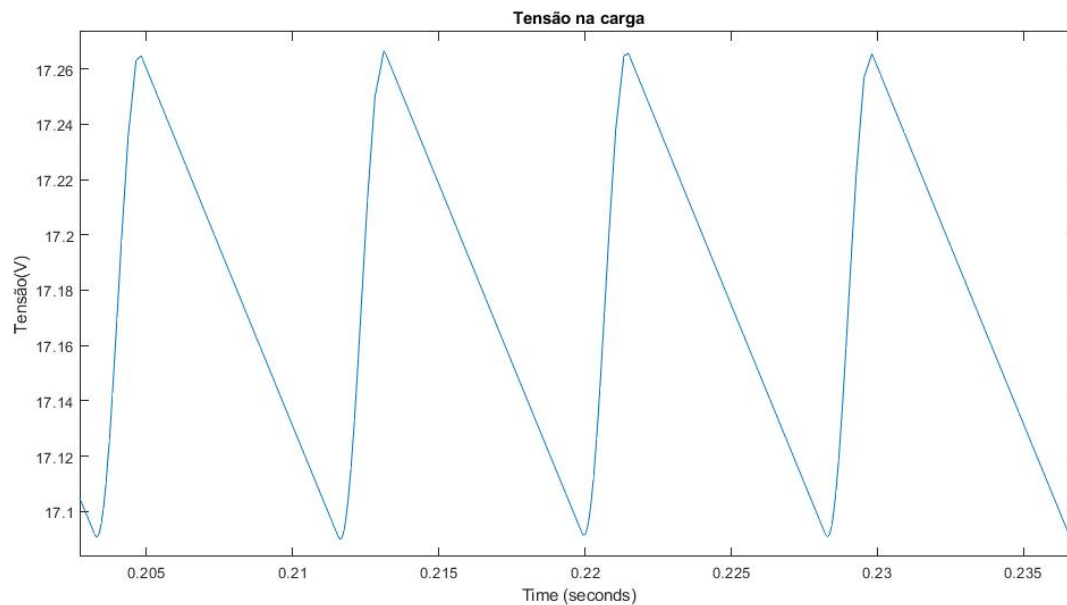


Figura 26: Tensão na carga.

As variações resultaram em variação proporcional na tensão média que é fornecida à carga.

2.3 Soluções para proteger a tensão de saída contra variações na entrada

Para realizar uma proteção na tensão de saída contra variações conhecidas na entrada podemos utilizar retificadores controlados, como serão simulados à frente neste relatório. Ainda podemos estabelecer também uma proteção contra surtos de tensão, utilizando elementos como varistores.

3 Retificadores Trifásicos

Para os experimentos serão considerados os seguintes valores:

- $V_{\text{fase}} = 127\text{V (rms)}$
- $V_{\text{diodo}} = 0.7\text{ V}$
- $f = 60\text{ Hz}$
- $R = 100\ \Omega$
- $L = 100\text{mH}$
- $C = 100\mu\text{F}$

3.1 Carga R

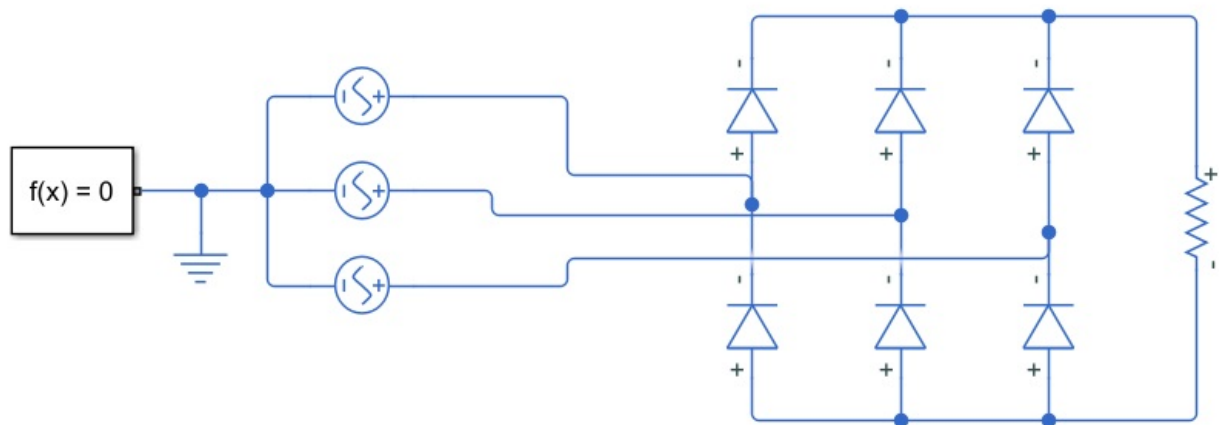


Figura 27: Modelo de retificador trifásico com carga R.

O modelo acima foi construído no Simulink para obtenção dos resultados do retificador trifásico com carga R.

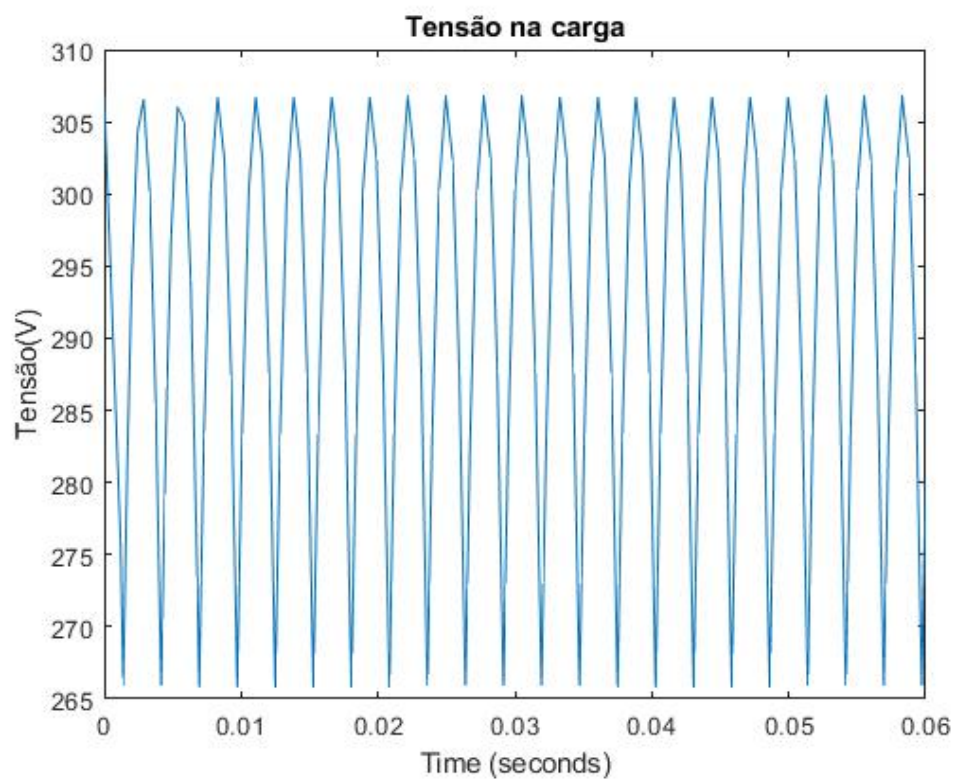


Figura 28: Tensão na carga.

A tensão obtida após o retificador apresenta ainda um ripple de aproximadamente 40V.

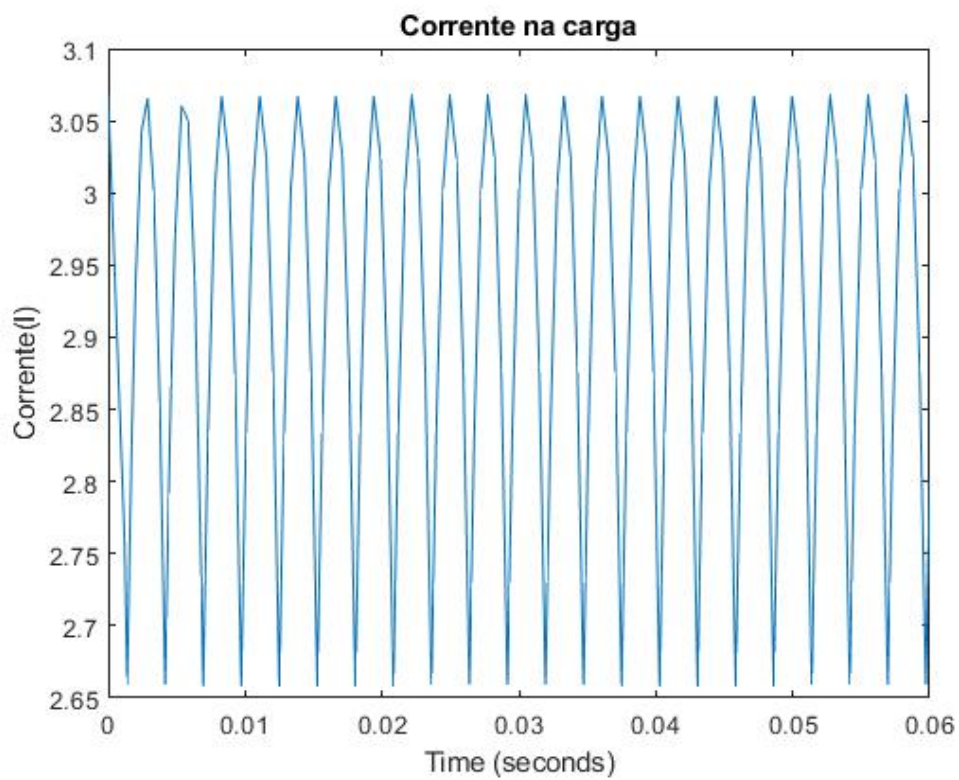


Figura 29: Corrente na carga.

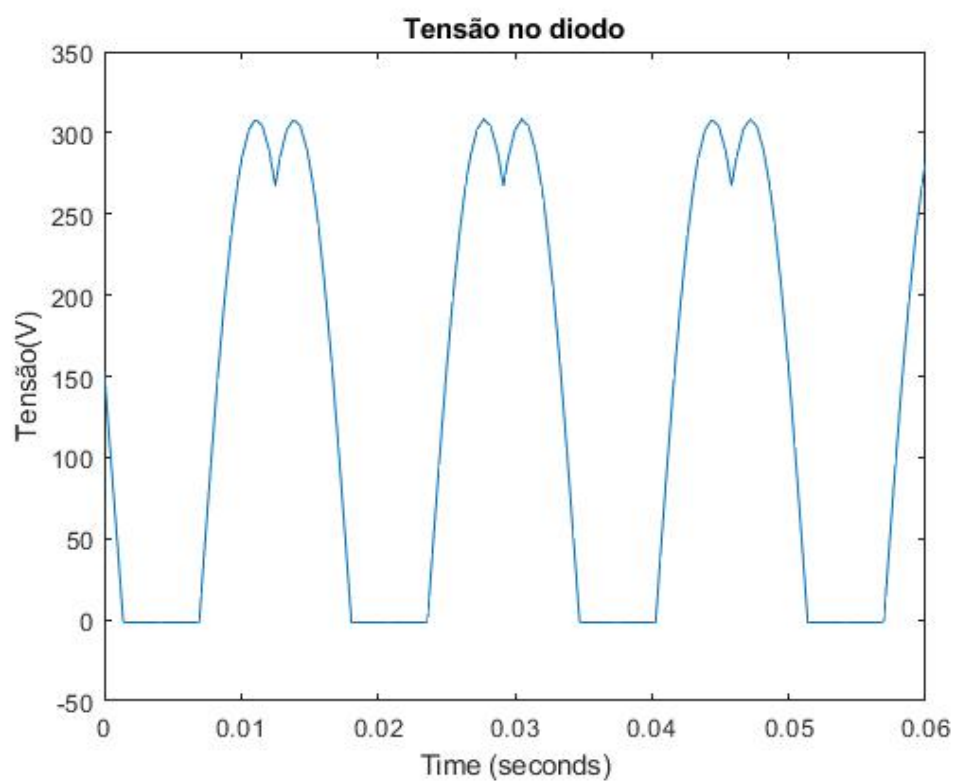


Figura 30: Tensão no diodo.

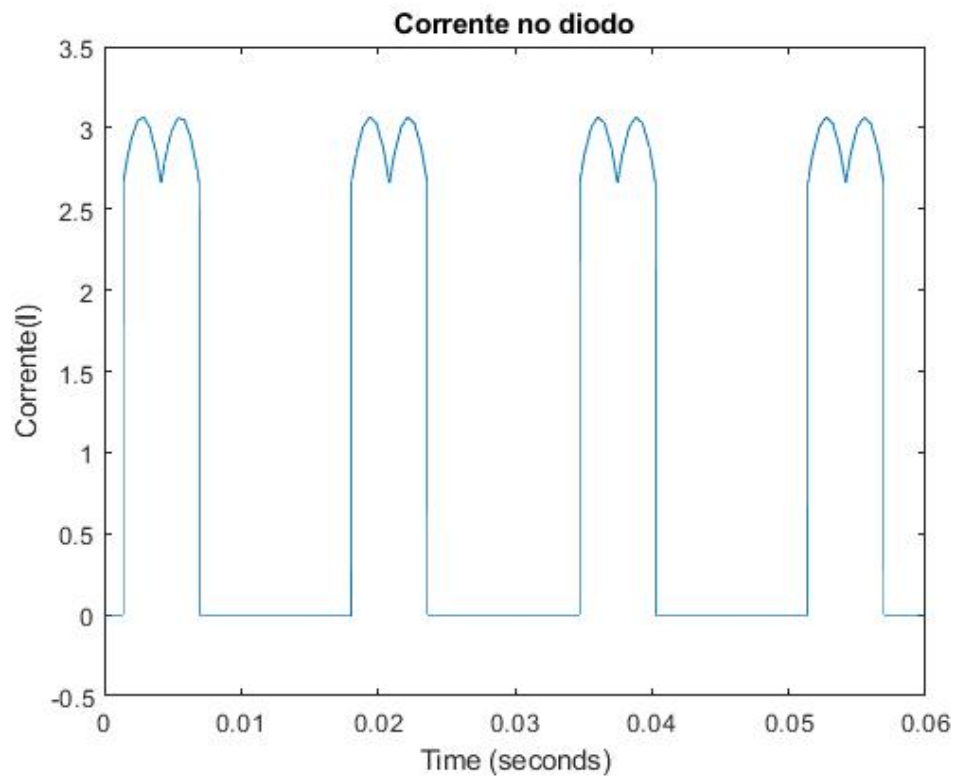


Figura 31: Corrente no diodo.

Obtendo a corrente do primeiro diodo, podemos notar que cada um conduz durante 1/3 do ciclo.

3.2 Carga RL

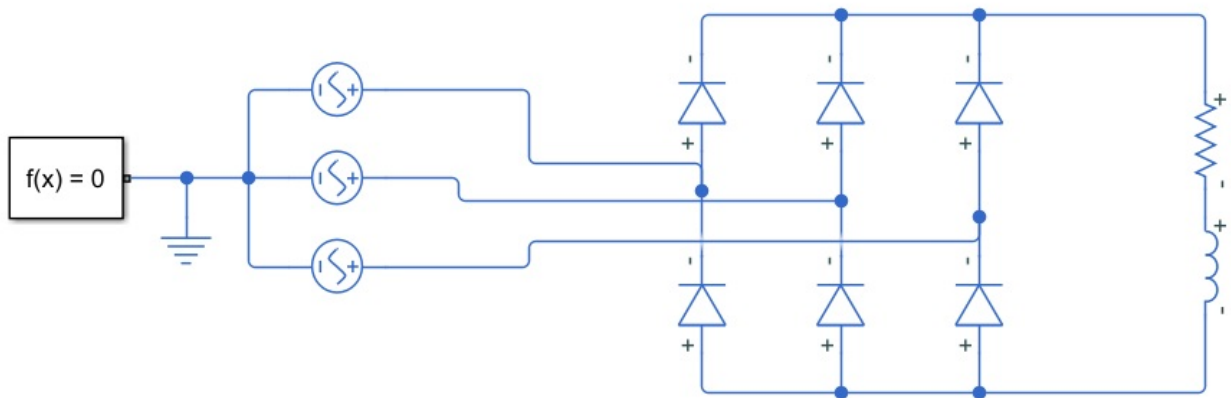


Figura 32: Modelo de retificador trifásico com carga RL.

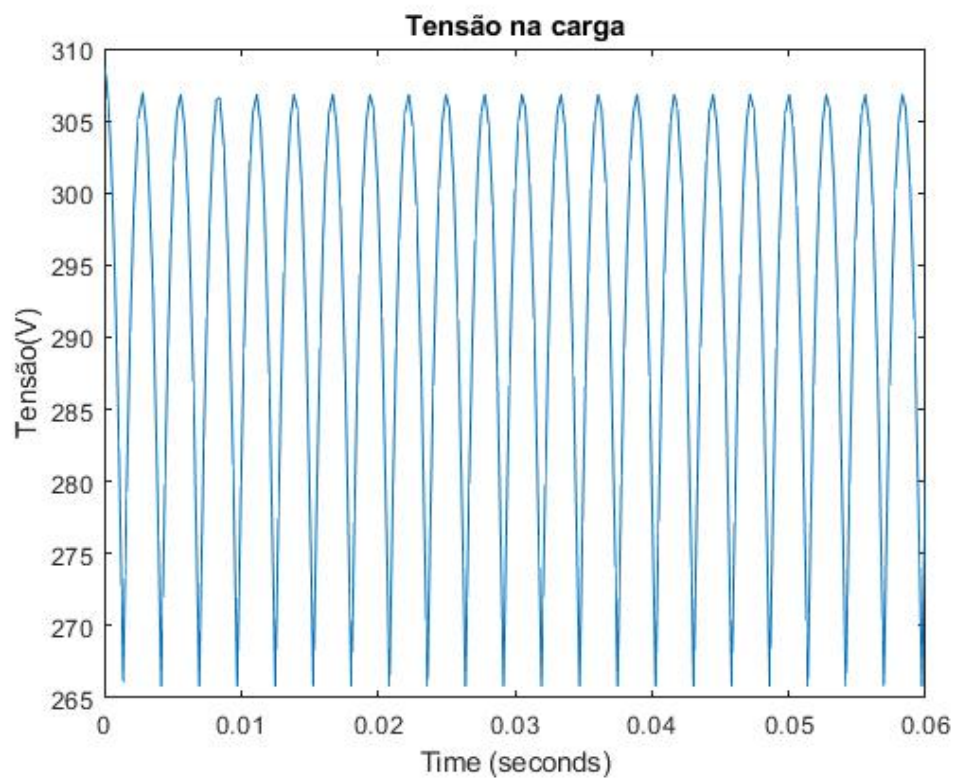


Figura 33: Tensão na carga.

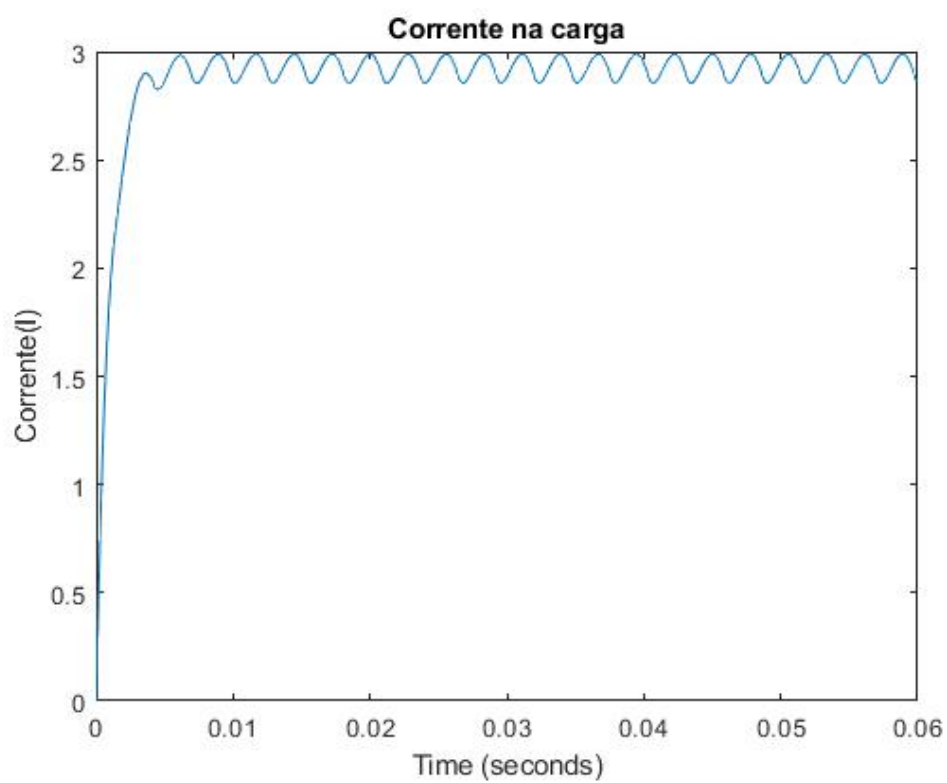


Figura 34: Corrente na carga.

O indutor reduz consideravelmente o ripple na carga.

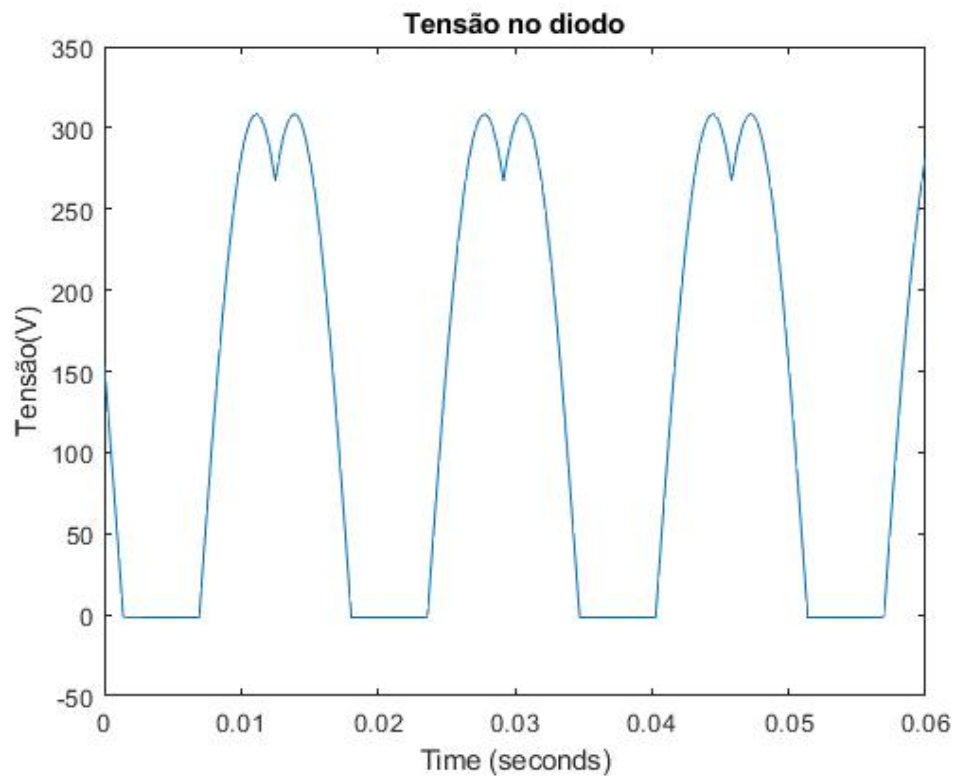


Figura 35: Tensão no diodo.

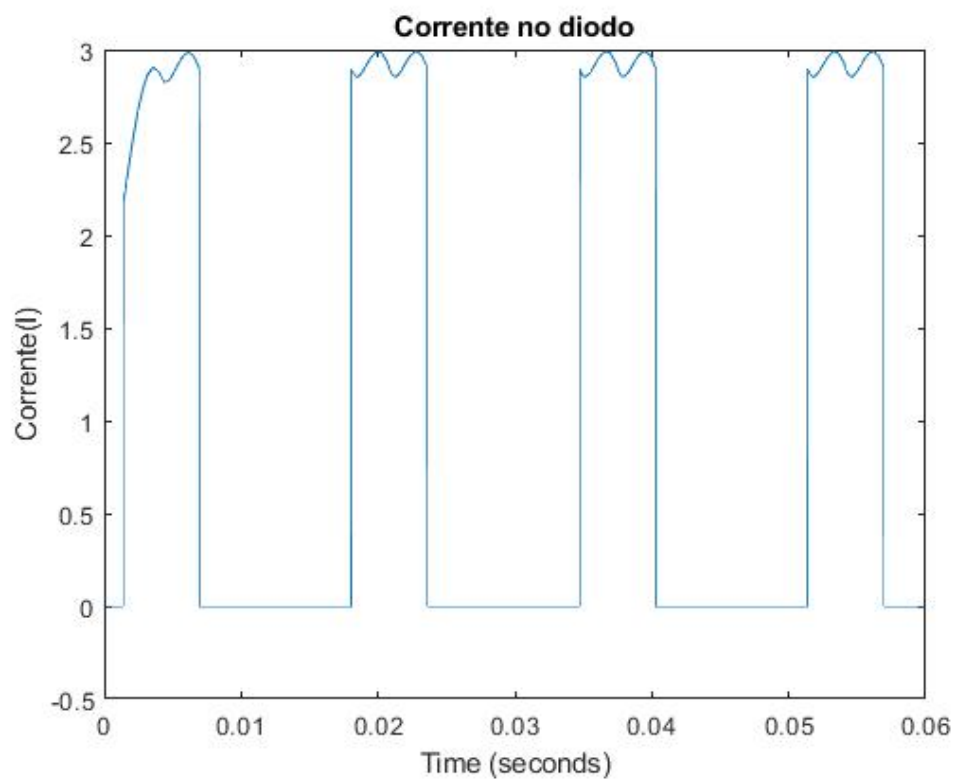


Figura 36: Corrente no diodo.

Além disso, causa um atraso de corrente nos diodos.

3.3 Carga RC

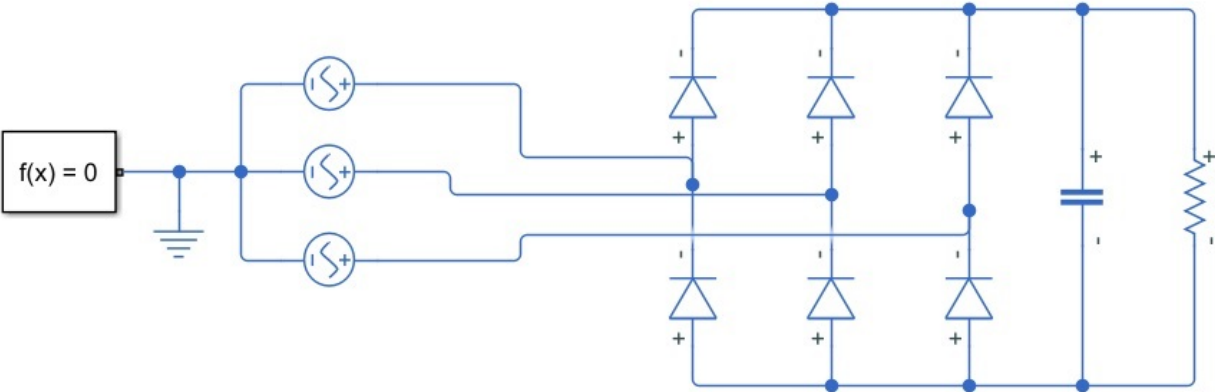


Figura 37: Modelo de retificador trifásico com carga RC.

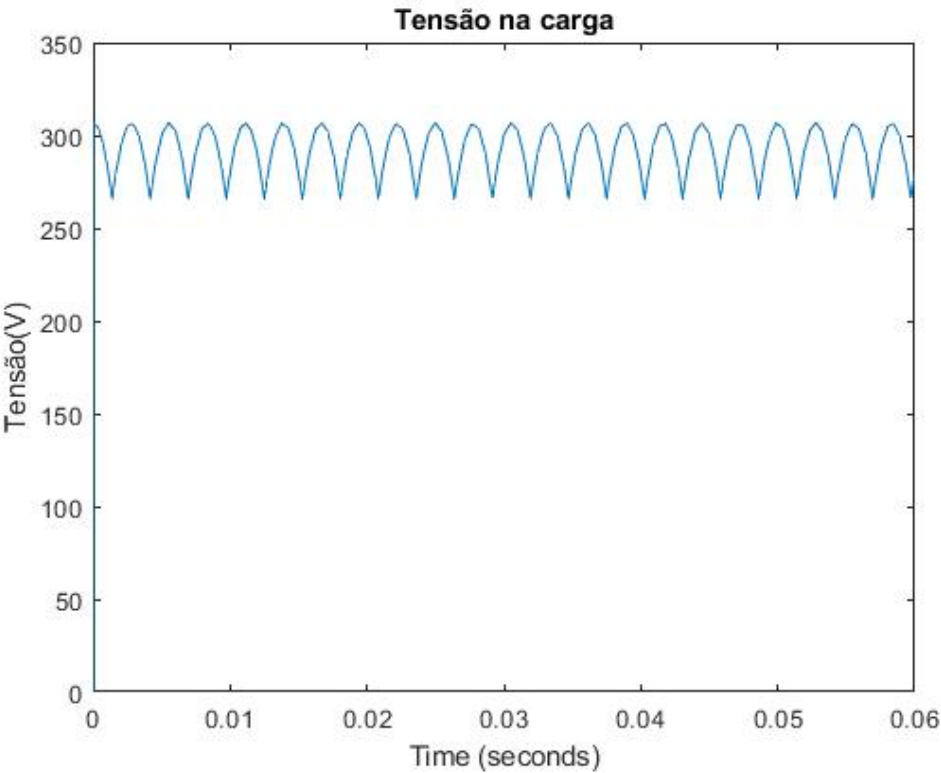


Figura 38: Tensão na carga.

O capacitor causa a redução do ripple da tensão aplicada na carga.

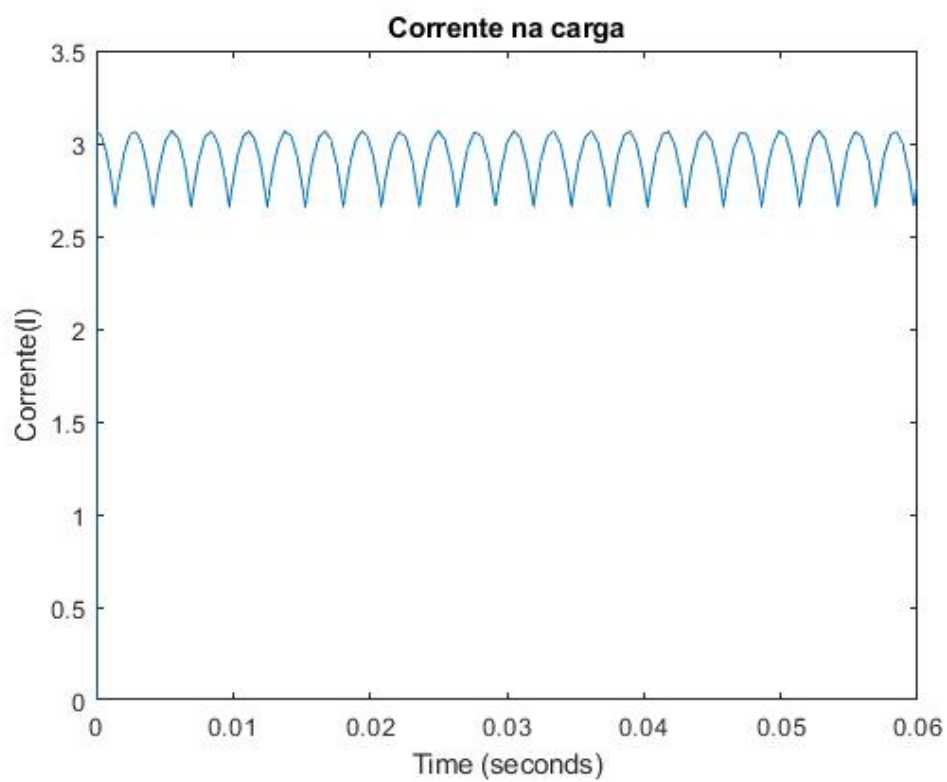


Figura 39: Corrente na carga.

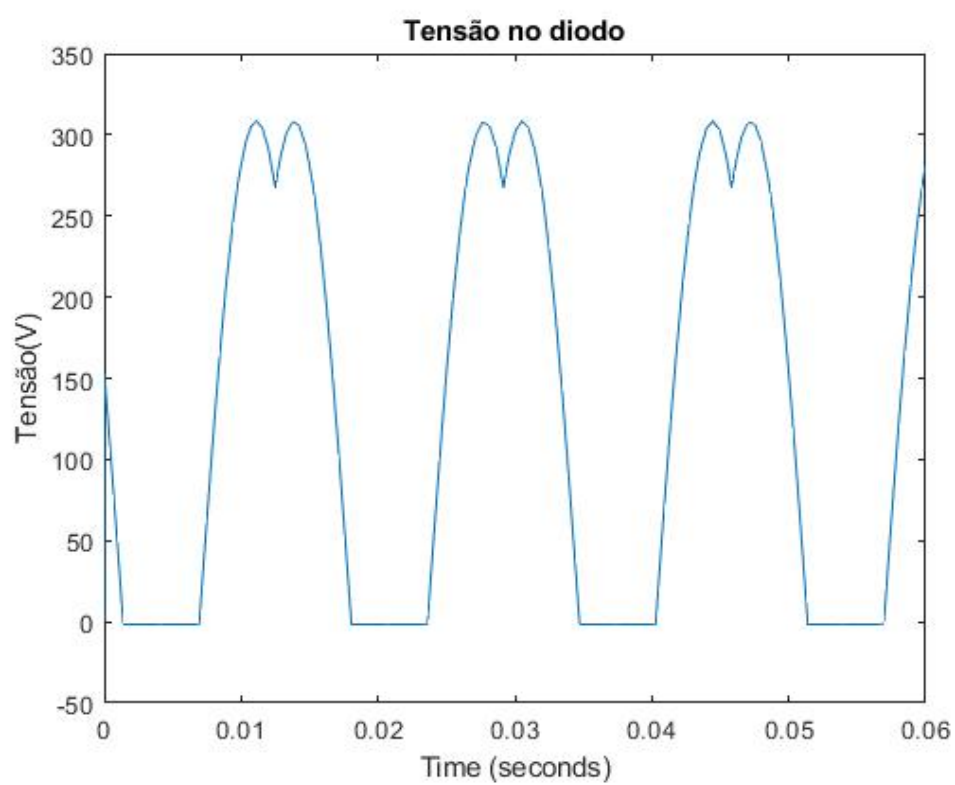


Figura 40: Tensão no diodo.

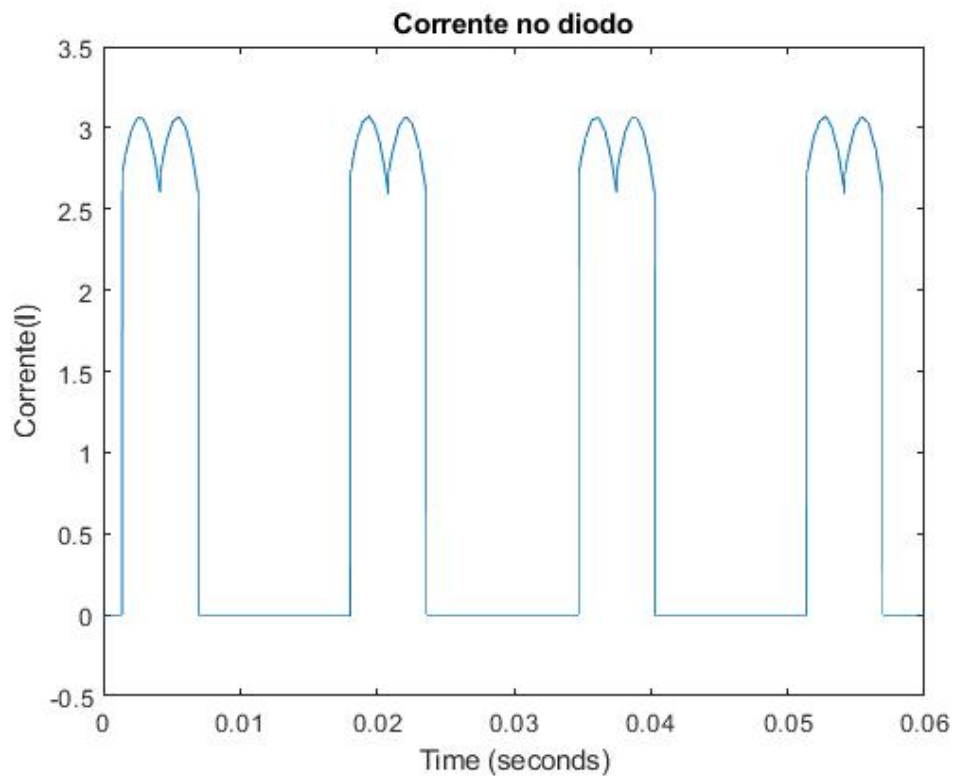


Figura 41: Corrente no diodo.

4 Retificadores Controlados

4.1 Retificador de Meia Onda Controlado

Para a modelagem do retificador Retificador de Meia Onda Monofásico Controlado com carga R. Utilizamos os seguintes atributos:

- $R = 100\Omega$
- $V_{rms} = 100V$
- $f = 60Hz$

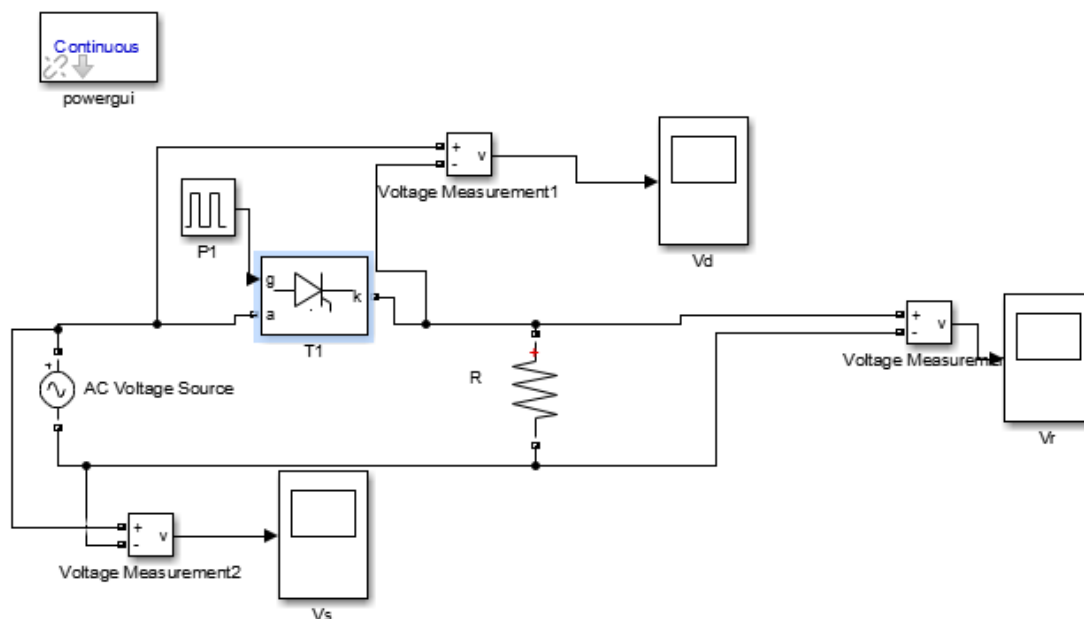


Figura 42: Circuito Retificador de Meia Onda Monofásico Controlado com carga R

Obtendo a porcentagem da tensão de saída em relação a eficaz baseada no angulo de disparo alpha temos:

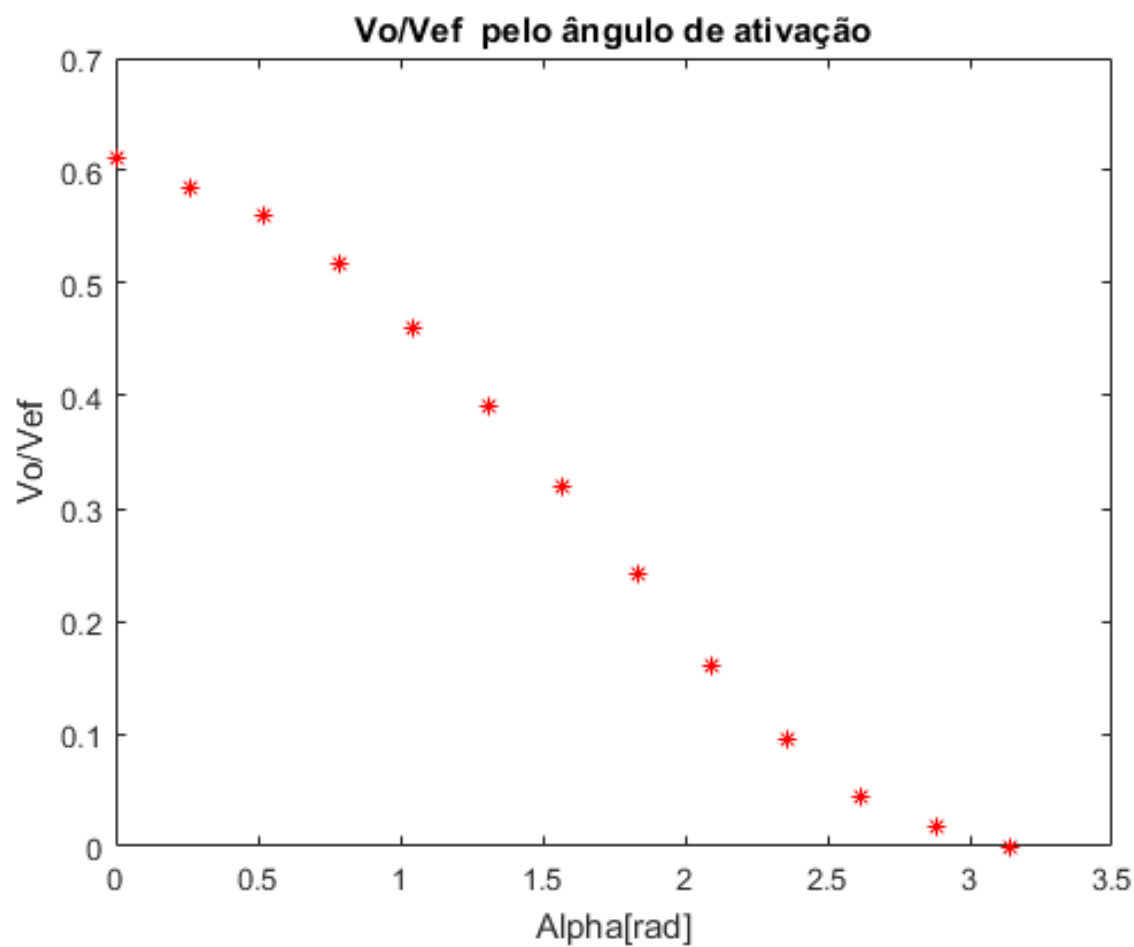


Figura 43: V_o/V_{ef} pela angulação do angulo de disparo alpha

Este comportamento ocorre porque o diodo para de conduzir quando a tensão de entrada é negativa, visto que a não há. Logo, quanto maior o valor de α até chegar em π , menor é de tensão na onda.

4.2 Retificador de Onda Completa controlado

Para a modelagem do retificador Retificador de Onda Completa Monofásico Controlado com carga R,RL,RLE. Utilizamos os seguintes atributos:

- $R = 100\Omega$
- $L = 0.1H$
- $L = 30000H$ (caso para L grande)
- $E = 50V$
- $V_{rms} = 100V$
- $f = 60Hz$
- $\alpha = \pi/3$

A escolha do $\alpha = \pi/3$ foi feita para melhor explicação dos comportamentos dos gráficos.

Além disso, a configuração dos dois pulsos de disparo são dadas a seguir:

Tabela 1: Parâmetros dos Pulsos de disparo P1 e P2 para Retificador de Onda Completa controlável

Variável	Pulso1	Pulso2
Frequência(Hz)	60	60
Amplitude(V)	1	1
Pulso(rad)	$\alpha/2 \cdot \pi \cdot 60$	$(\alpha + \pi)/2 \cdot \pi \cdot 60$

4.2.1 Carga R

A configuração do Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga R é dada a seguir:

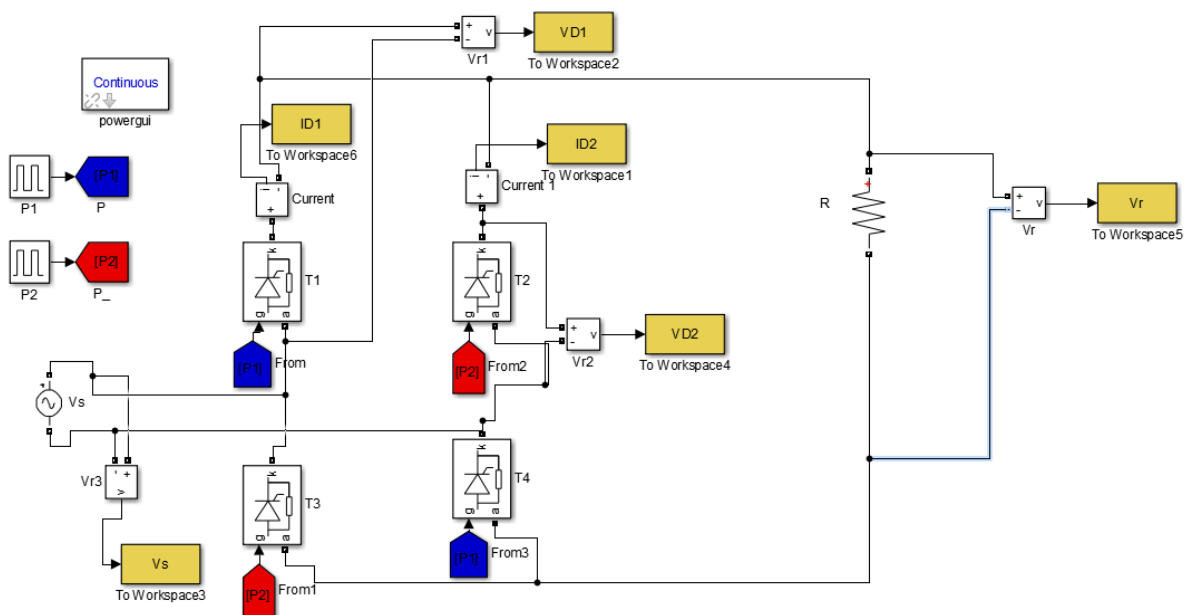


Figura 44: Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga R

A tensão na saída do resistor pode ser vista a seguir:

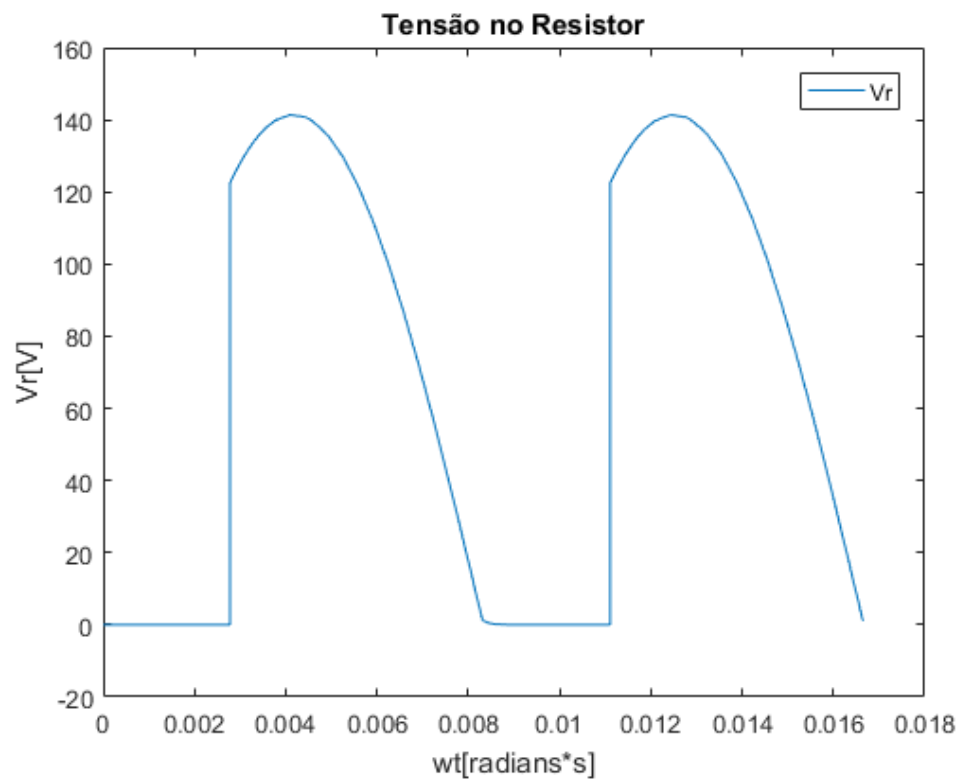


Figura 45: Corrente no diodo.

É possível observar que pelo fato de utilizarmos $\alpha = \pi/3$ parte da onda foi cortada, como provado no item 4a), pelo aumento de α .

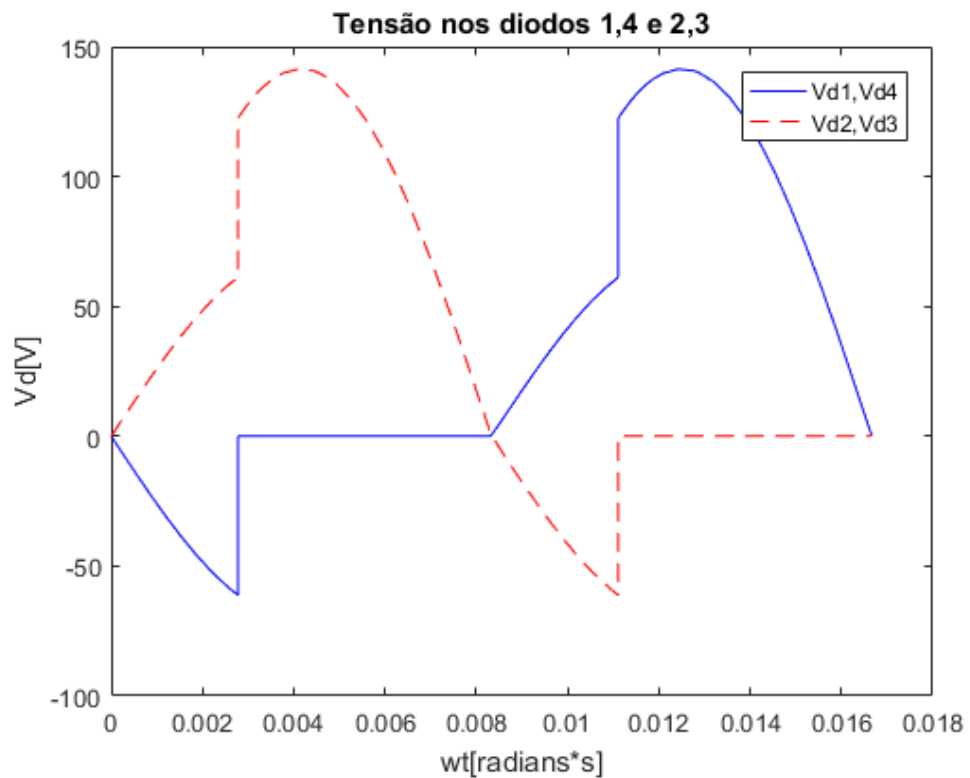


Figura 46: Tensão nos tiristores.

É possível observar que as ondas estão distorcidas, o que ocorre devido a presença de uma reatância capacitiva de chopper em paralelo com o tiristor, em que para esta configuração de circuito e todas as monofásicas de onda completa, o Simulink obrigou a mantê-las. Além disso, vemos que por ser um circuito retificador de onda completa, temos dois picos a cada 2π . Isso ocorre, pois no primeiro ciclo os tiristores que conduzem são T1 e T4 e no segundo T2 e T3.

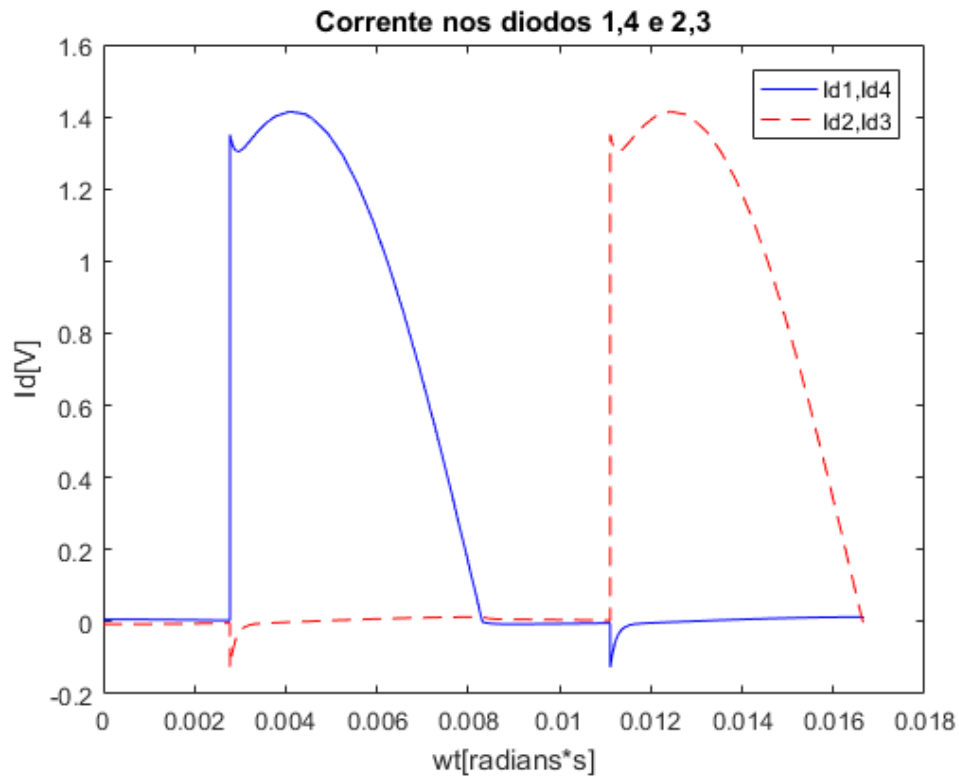


Figura 47: Corrente nos tiristores.

É possível observar que as correntes no tiristor acompanham a mesma fase do que a tensão. Além disso, pela presença do chopper, vemos o efeito da **Corrente de Recuperação Reversa**, agindo sobre a forma de onda da corrente nos tiristores.

4.2.2 Carga RL

A configuração do Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL é dada a seguir:

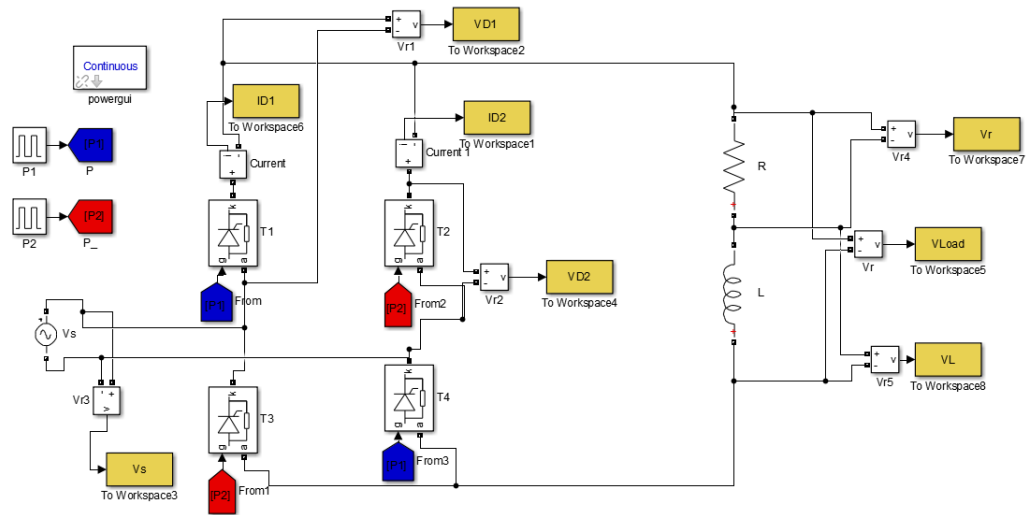


Figura 48: Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL

Foi extraído o comportamento de todas as tensões para o Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL, com L pequeno, as quais podemos observar a seguir:

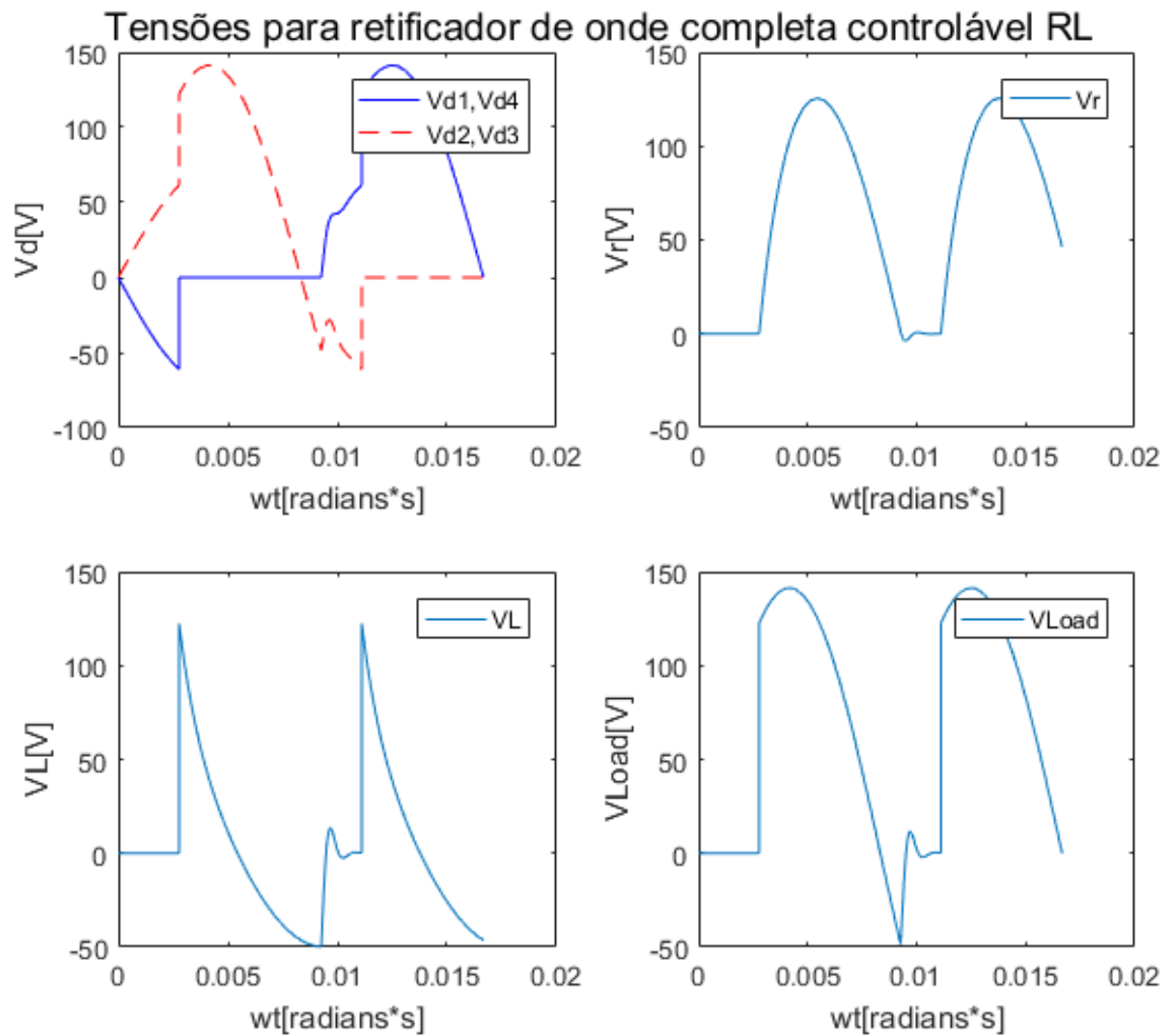


Figura 49: Tensões no Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL com L pequeno

1. Tensão nos tiristores: Podemos observar que a tensão no tiristor possui uma parcela negativa, devido ao fato de o indutor continuar fornecendo corrente mesmo quando a fonte de tensão está no semi-ciclo negativo.
2. Tensão no resistor: Observa-se que o resistor está sempre positivo e com as ondas muito próximas ao circuito R, mesmo com a presença de α . Isso ocorre porque o indutor permite que praticamente sempre haja corrente passando pelo resistor.
3. Tensão no Indutor: A tensão no indutor sobre ao valor máximo quando há a pulsação e em seguida começa a diminuir por o indutor começa a fornecer corrente.
4. Tensão na carga RL: Podemos observar o comportamento completo, em que não tensão até a presença do pulso, em seguida segue como o retificador de onda completa até passar para tensões negativas, devido ao fornecimento de corrente pelo indutor. Isso faz com que a tensão média da saída seja menor em relação ao circuito que apenas possui carga R.

Foi extraído o comportamento de todas as tensões para o Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL, com L grande, as quais podemos observar a seguir:

1. Tensões nos Tiristores: A tensão nos tiristores passa a ignorar a defasagem α a partir do segundo pico.

2. Tensão no Resistor: A Tensão no resistor é pequena, pois ela fica quase que completamente armazenada no indutor, mas pelas perdas do indutor, a tensão no resistor cresce aos poucos.
3. Tensão no indutor: É quadrada, devido a indutância muito alta.
4. Tensão na carga RL: É praticamente a no indutor, pois R e L estão em série e R é muito pequeno.

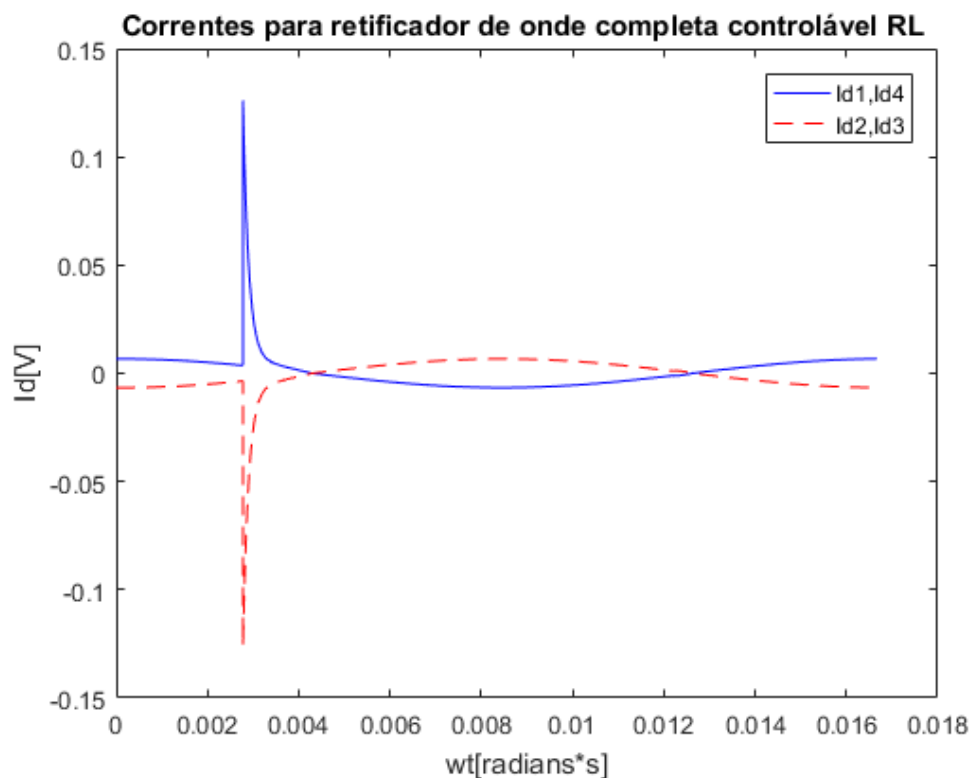


Figura 50: Correntes no Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RL com L Grande

Observa-se claramente que as correntes nos tiristores é absorvida rapidamente para o indutor, devido a alta indutância.

4.2.3 Circuito RLE

A configuração do Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RLE é dada a seguir:

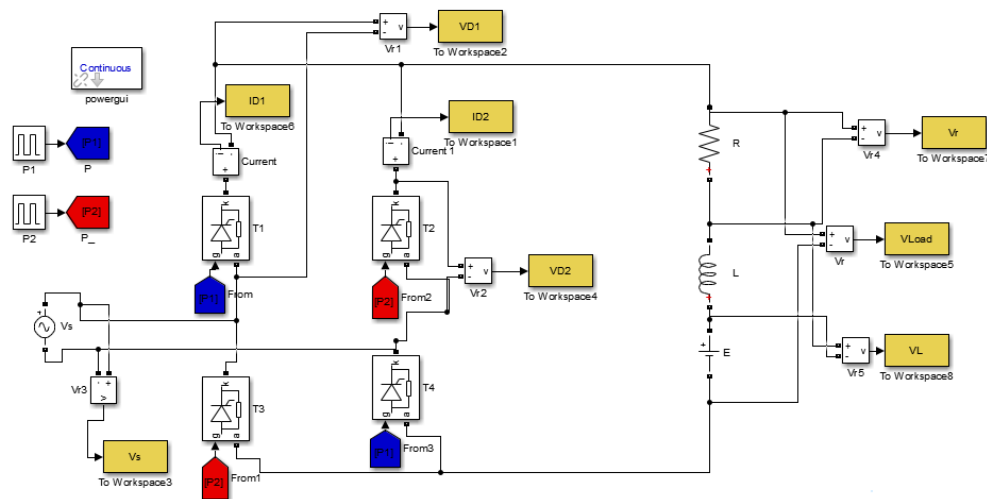


Figura 51: Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RLE.

Foi extraído o comportamento de todas as tensões para o Circuito Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RLE, as quais podemos observar a seguir:

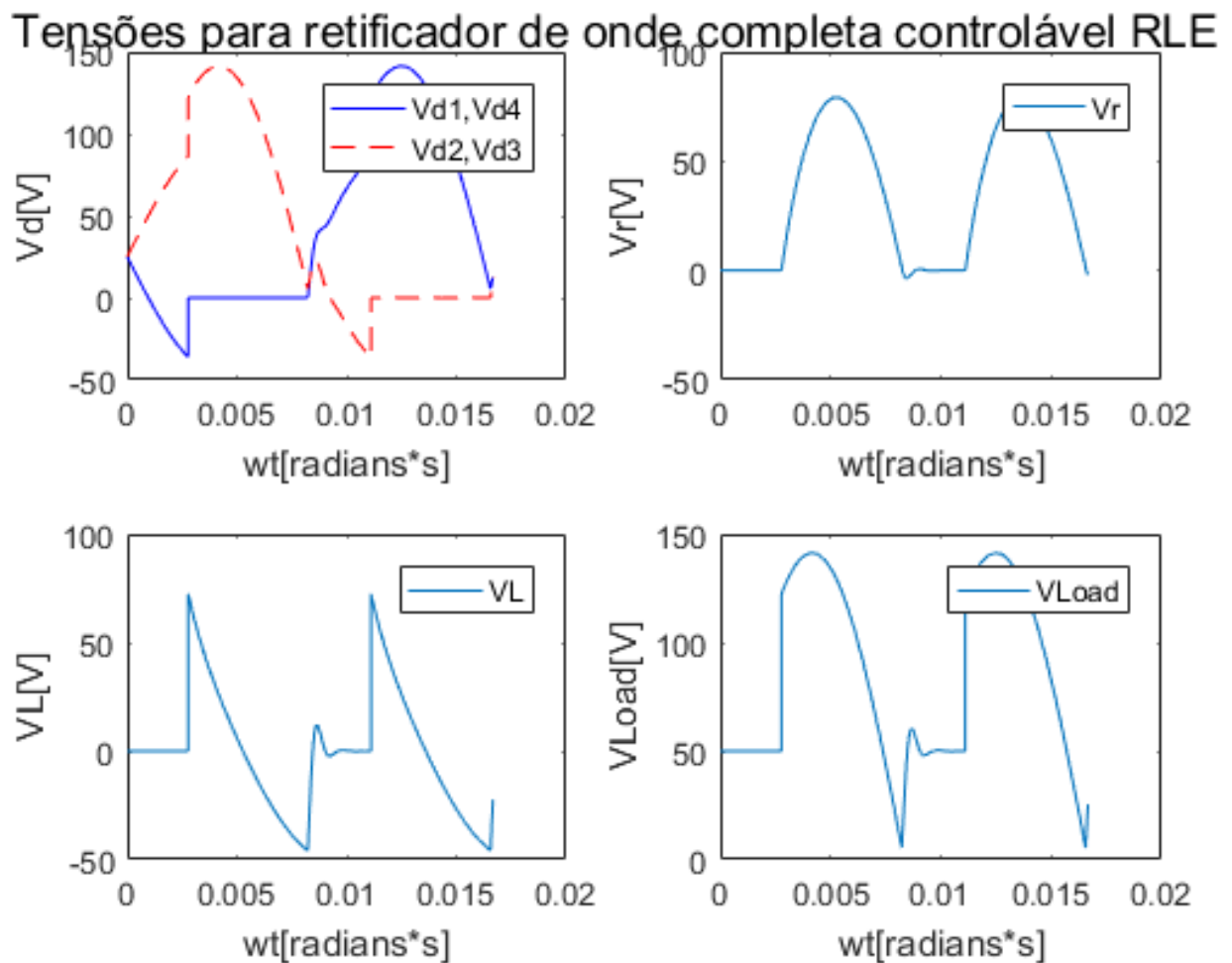


Figura 52: Tensões no Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RLE.

1. Tensão Tiristores: Não houve diferença na tensão dos tiristores em comparação com o circuito RL.

2. Tensão na Indutância: A tensão na indutância decresceu em 50V, exatamente o valor da fonte de tensão contínua E.
3. Tensão na Resistência: A tensão na indutância decresceu em 50V, exatamente o valor da fonte de tensão contínua E.
4. Tensão na carga RL: Na carga RL, a tensão começa a partir de 50V, visto que agora ele é o "zero" de referência para a corrente conduzir.

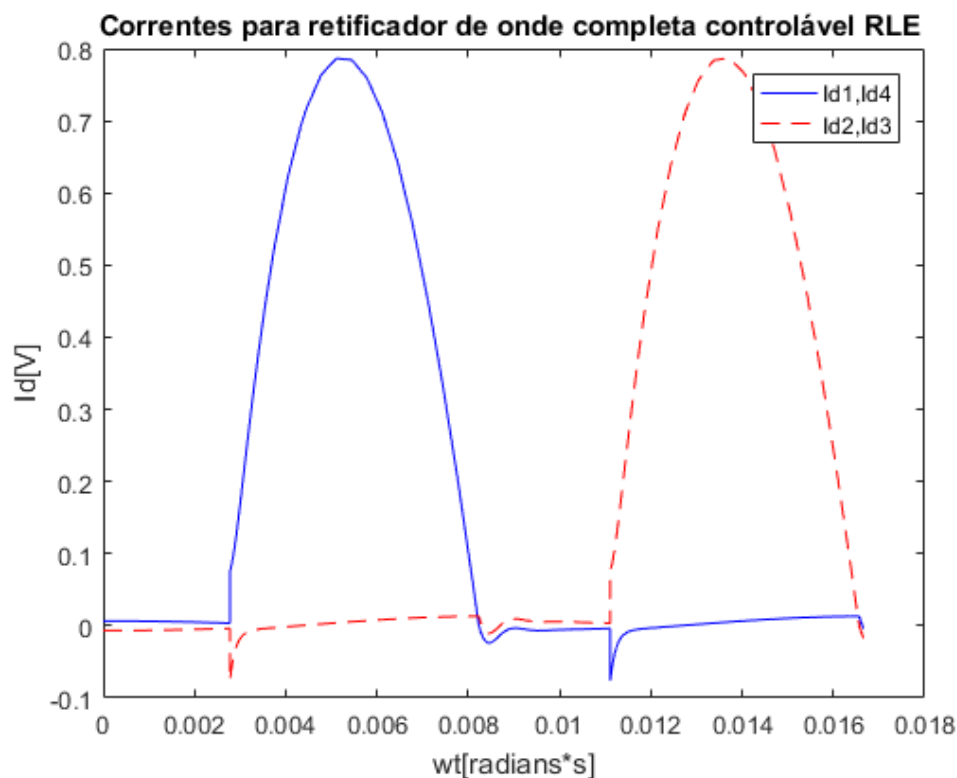


Figura 53: Correntes nos tiristores para Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado com carga RLE.

5 Retificadores Trifásicos Controlados

5.1 Retificador de Meia Onda

Para a construção do retificador de meia onda foram utilizados os seguintes parâmetros:

- $f = 60\text{Hz}$
- $V_{\text{rms}} = 100\text{V}$

É importante observar que para a sincronização dos pulsos foi necessário configurar os geradores de pulsos com:

Tabela 2: Parâmetros do motor CC para ligação em paralelo sem carga

Variável	Pulso1	Pulso2
Frequência(Hz)	60	60
Amplitude(V)	1	1
Pulso(rad)	$\alpha/2 \cdot \pi \cdot 60$	$(\alpha + \pi)/2 \cdot \pi \cdot 60$

5.1.1 Carga R

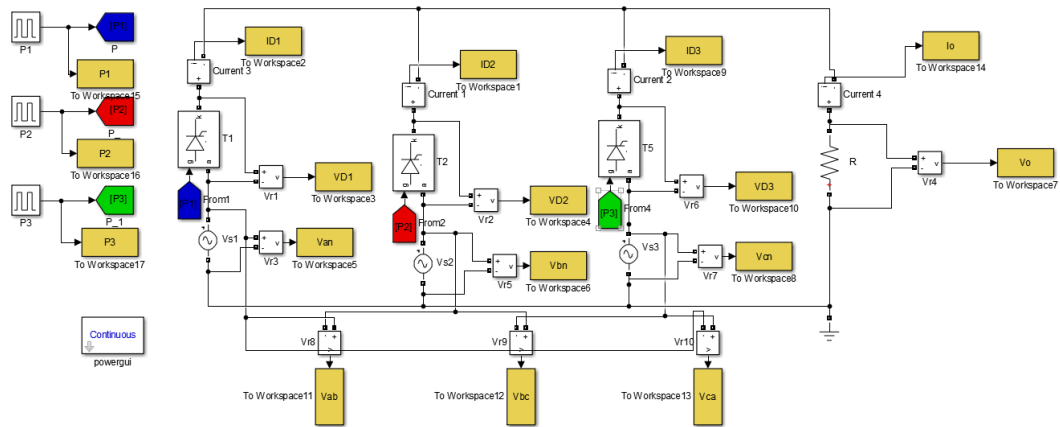


Figura 54: Modelo construído no Simulink.

Foram obtidos os valores da tensão na carga para os casos de $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$, conforme os gráficos a seguir:-

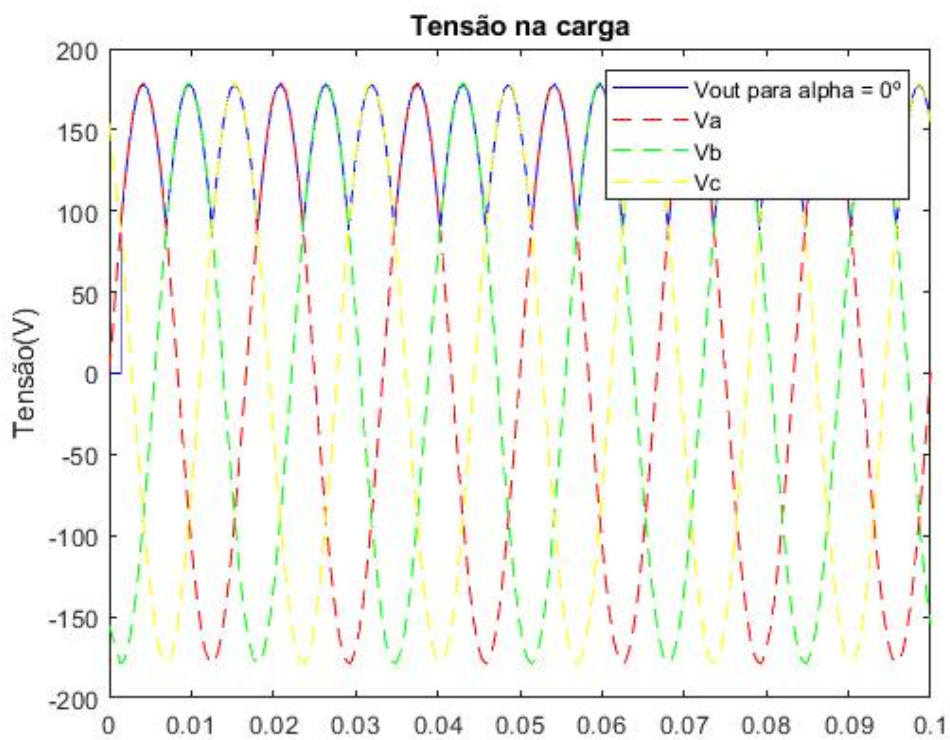


Figura 55: Tensão na carga para $\alpha = 0^\circ$.

Nesta configuração, podemos notar que a tensão instantânea na carga é igual à da fase com maior potencial.

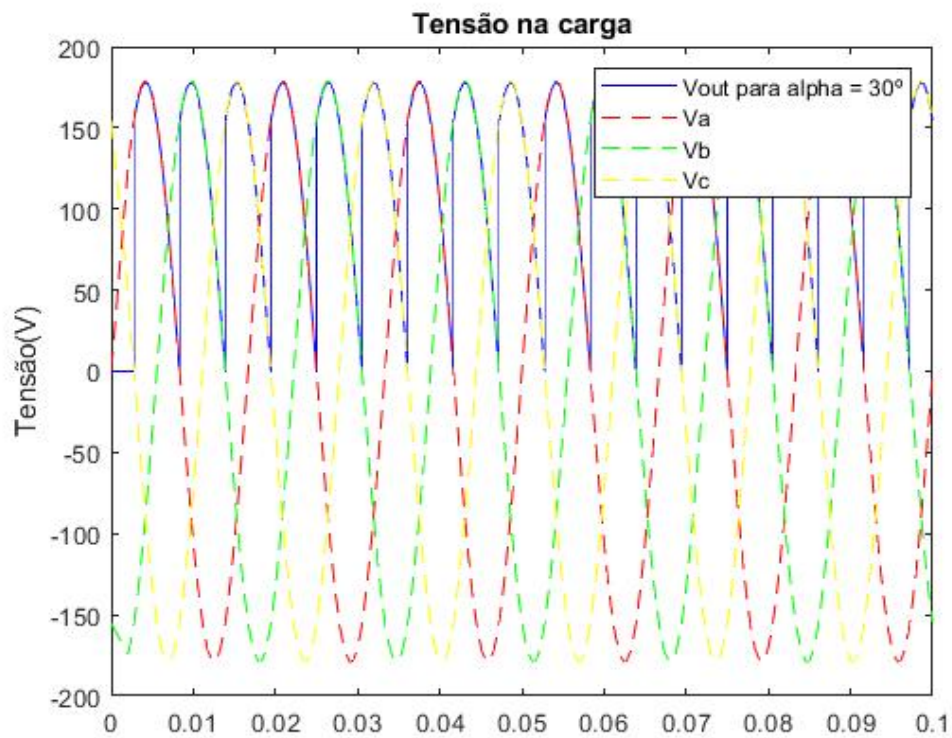


Figura 56: Tensão na carga para $\alpha = 30^\circ$.

Com o ângulo de disparo de 30° , obtemos um atraso no início da condução na carga em relação às fases.

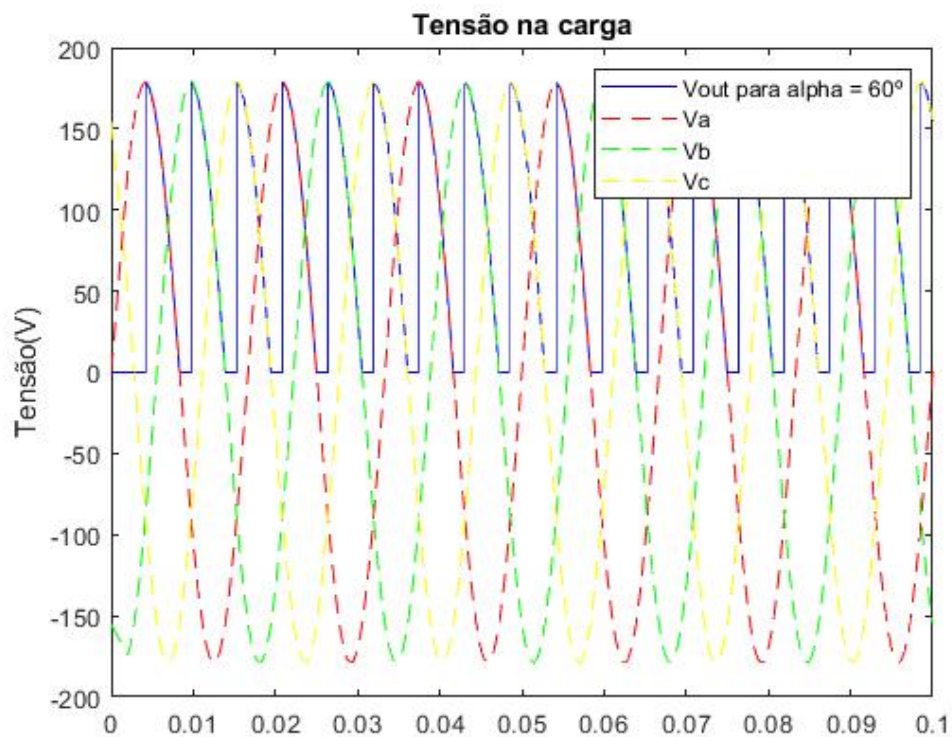


Figura 57: Tensão na carga para $\alpha = 60^\circ$.

Da mesma forma que o caso anterior, para o ângulo de 60° obtemos uma defasagem maior para o início da condução.

5.2 Retificadores de Onda Completa

5.2.1 Carga R

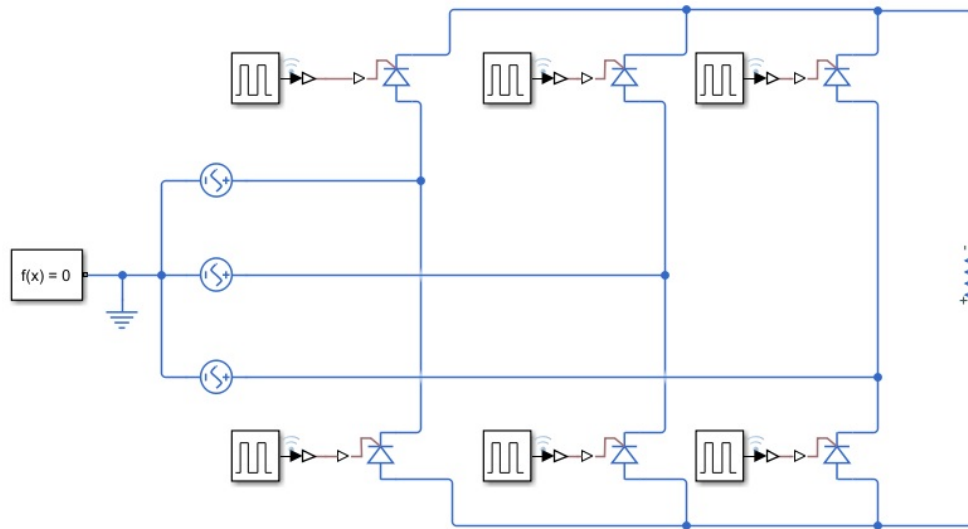


Figura 58: Modelo construído no Simulink.

Para realizar a simulação do retificador trifásico de onda completa, foi construído o modelo no Simulink apresentado acima. Nesta configuração, a tensão na carga segue a maior diferença de potencial instantânea entre duas fases, com cada tiristor conduzindo durante o intervalo em que a sua fase é máxima, no caso de T1, T2 e T3, ou mínima, no caso de T4, T5 e T6.

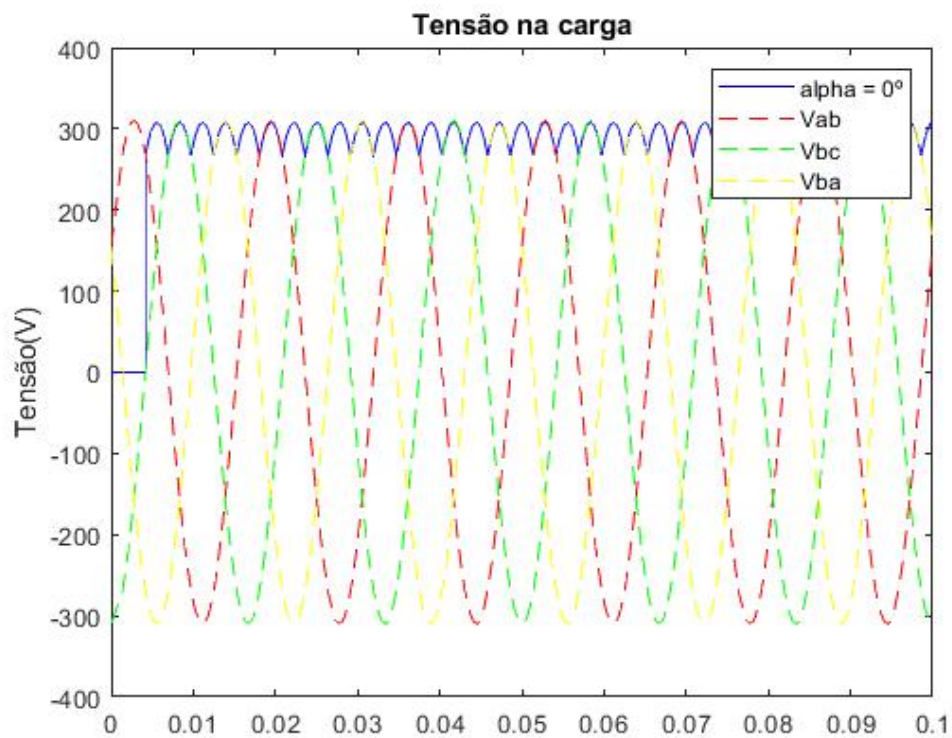


Figura 59: Tensão na carga - Alpha = 0° .

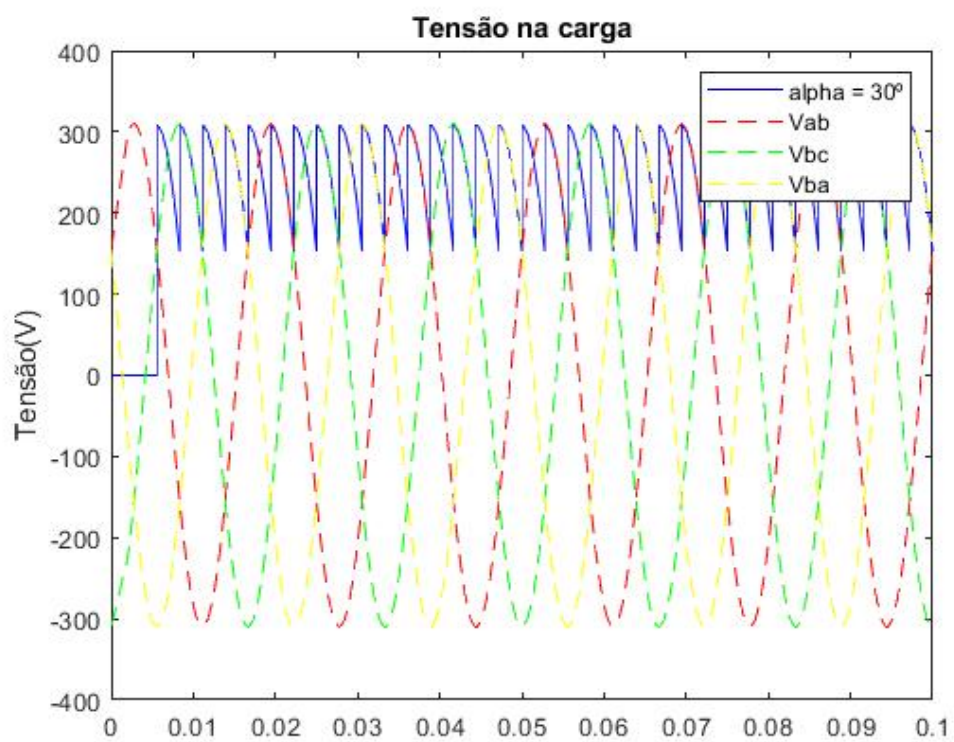


Figura 60: Tensão na carga - Alpha = 30° .

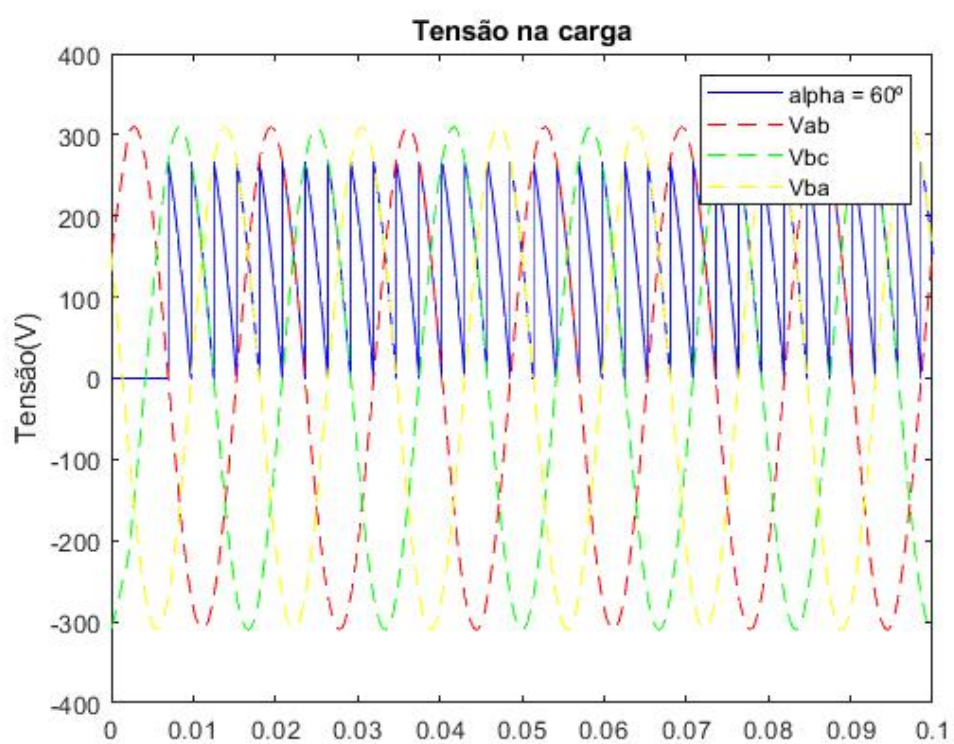


Figura 61: Tensão na carga - Alpha = 60° .

5.2.2 Carga RL

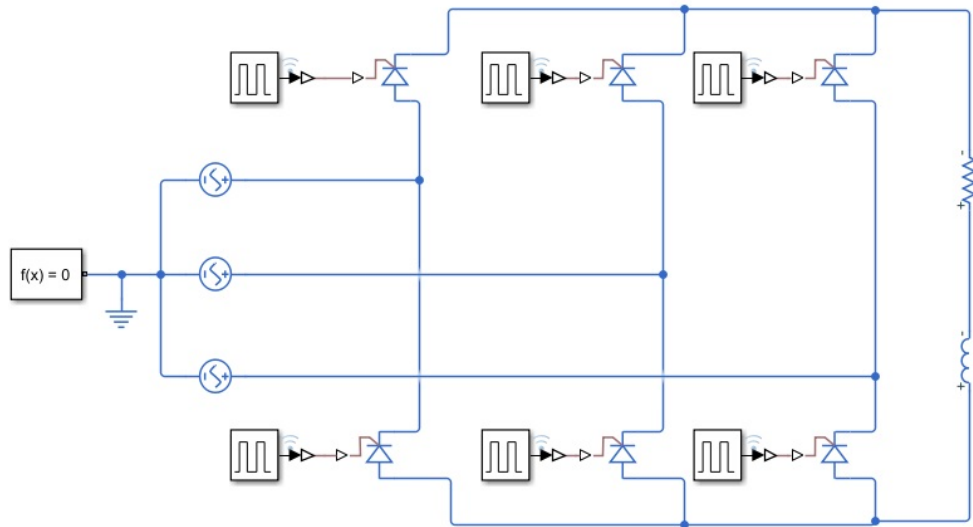


Figura 62: Modelo construído no Simulink.

A partir do modelo de retificador trifásico controlado de onda completa, foi adicionado um indutor para reduzir a ondulação da corrente.

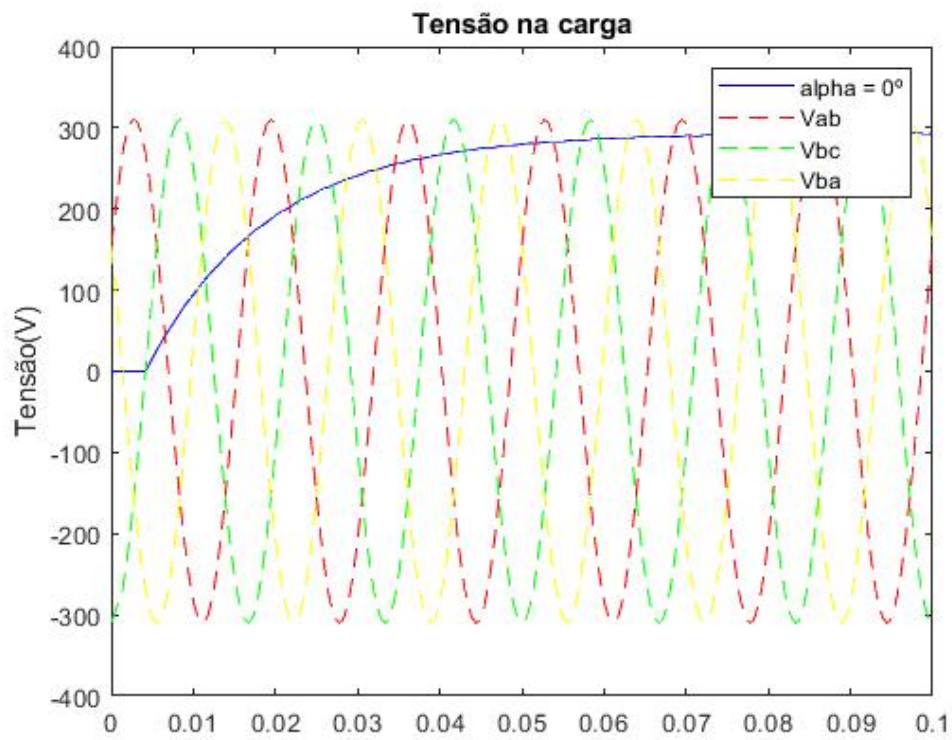


Figura 63: Tensão na carga - Alpha = 0° .

No caso de $\alpha = 0^\circ$, obtemos uma tensão próxima da tensão de linha do sistema.

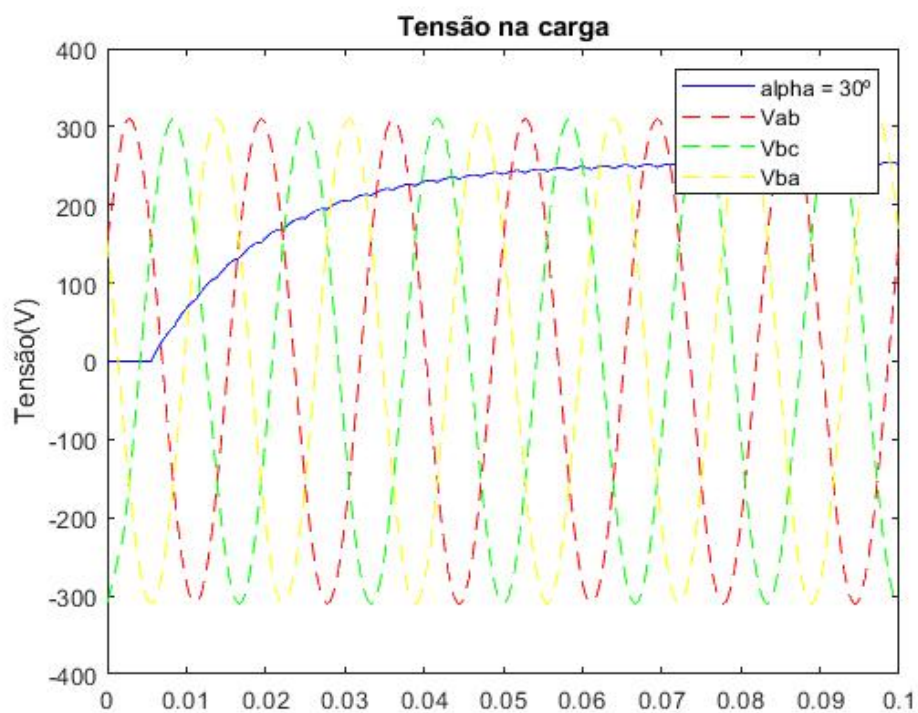


Figura 64: Tensão na carga - Alpha = 30°.

Para $\alpha = 30^\circ$, temos uma queda de tensão média. De acordo com a teoria, esta queda é de $1 - \cos(30) = 0.14$, o que é coerente com o valor apresentado na simulação.

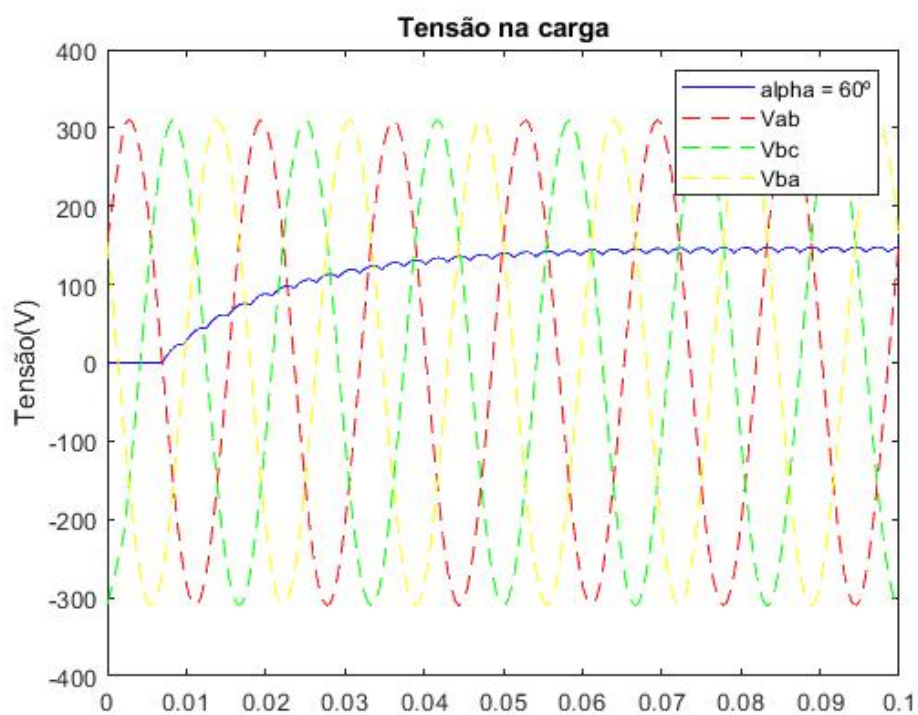


Figura 65: Tensão na carga - Alpha = 60°.

Para $\alpha = 60^\circ$, a queda na tensão média é de $1 - \cos(60) = 0.5$, com o valor simulado também se aproximando desse valor.

6 Referências Bibliográficas

SEN, P.C. “Principles of Electric Machines and Power Electronics” Wiley India Pvt. Limited, Second Edition, 2007.