

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**Retificador e Conversor CC-CC**

**RELATÓRIO DA DISCIPLINA DE FUNDAMENTOS DA ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA  
Prof. Rafael Concatto Beltrame**

**Guilherme Ramos Londero  
Raul Santos Ferreira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2022**

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1 PARÂMETROS E RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA</b>	<b>3</b>
1.1 Parâmetros	3
1.2 Retificador de Onda Completa	3
1.3 Conversor CC-CC Flyback	6
<b>CAPÍTULO 2 PROJETO DO RETIFICADOR E DO CONVERSOR</b>	<b>8</b>
2.1 Projeto do Retificador de onda completa	8
2.2 Projeto do Conversor CC-CC Flyback	9
<b>CAPÍTULO 3 SIMULAÇÕES</b>	<b>13</b>
3.1 Simulação do retificador de onda completa	13
3.2 Simulação do conversor CC-CC Flyback	15
<b>CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO</b>	<b>17</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>18</b>

## INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência pode ser definida como a ciência que estuda conversores estáticos para o processamento eficiente da energia elétrica, adequando-se às especificações de carga [1]. Os conversores estáticos são definidos como dispositivos eletrônicos que convertem energia sem necessitar de peças móveis, pois são construídos por elementos passivos lineares (resistores, capacitores e indutores) e não lineares (diodos), e também por elementos ativos (MOSFET, SCR, TBJ, IGBT).

Os conversores estáticos são empregados no controle do fluxo de energia entre dois ou mais sistemas elétricos [1], algumas de suas aplicações são: Fontes chaveadas, Acionamento/controle de velocidade de máquinas elétricas, transmissão de energia elétrica em corrente contínua, No-breaks, fontes renováveis de energia, entre outras.

Este relatório tem como objetivo a apresentação do projeto e simulações de um conversor CC-CC de topologia FlayBack, a alimentação será feita através de um retificador de onda completa em configuração ponte. Para as simulações fez-se necessário a aplicação do software PSIM, que apesar de ter sido projetado especificamente para uso em simulações de eletrônica de potência e acionamento de motores, pode ser usado para qualquer circuito eletrônico.

# CAPÍTULO 1      PARÂMETROS E RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

## 1.1 Parâmetros

Os parâmetros utilizados para os componentes nas simulações no PSIM foram os de componentes ideais, ou seja, sem perdas. Os parâmetros tanto do retificador quanto do conversor CC-CC Flyback estão expostos na Tabela 1.

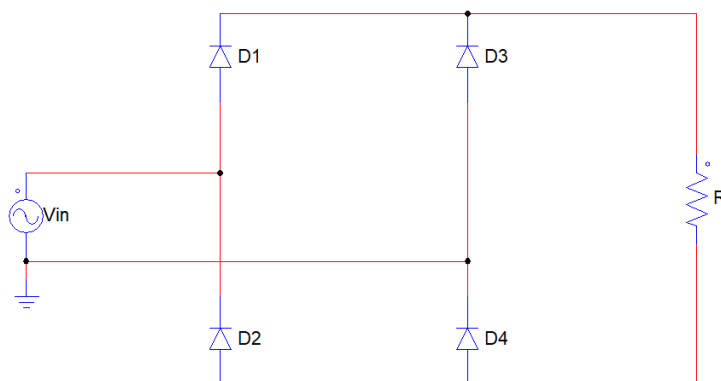
**Tabela 1 - Especificações dos conversores.**

Grupo	Retificador		Conversor CC-CC					
	Tensão Eficaz da Rede ( $V_{rede}$ )	Ondulação de Tensão ( $\Delta V_{CC\%}$ )	Topologia	Potência de Saída ( $P_o$ )	Tensão de Saída ( $V_o$ )	Frequência de Chaveamento <sup>1</sup> ( $f_s$ )	Ondulação de Tensão ( $\Delta v_o\%$ )	Ondulação de Corrente ( $\Delta i_L\%$ )
1	127 V   60 Hz	1,0%	Buck	500 W	50 V	1,4 kHz	2,5 %	20 %
2	127 V   60 Hz	1,0%	Boost	500 W	350 V	1,4 kHz	2,5 %	20 %
3	127 V   60 Hz	0,5%	Buck-Boost	500 W	250 V	1,4 kHz	2,5 %	20 %
4	127 V   60 Hz	0,5%	Flyback	90 W	3500 V	1,4 kHz	2,5 %	20 %
5	220 V   60 Hz	1,0%	Buck	400 W	100 V	1,8 kHz	2,0 %	15 %
6	220 V   60 Hz	1,0%	Boost	400 W	600 V	1,8 kHz	2,0 %	15 %
7	220 V   60 Hz	0,5%	Buck-Boost	400 W	450 V	1,8 kHz	2,0 %	15 %
8	220 V   60 Hz	0,5%	Flyback	80 W	6000 V	1,8 kHz	2,0 %	15 %

Fonte: Autores

## 1.2 Retificador de Onda Completa

A estrutura do retificador de onda completa em ponte é apresentado na Figura 2.

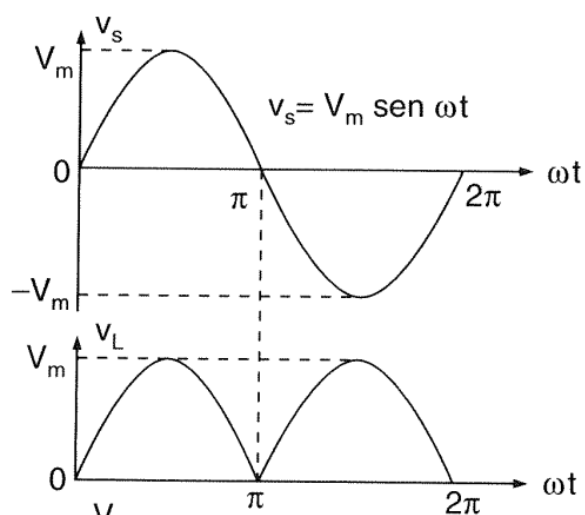


**Figura 1 - Retificador de onda completa.**

**Fonte: Autores**

O funcionamento do retificador ocorre em duas etapas: A primeira etapa ocorre durante o primeiro semiciclo, a tensão da fonte é positiva, os diodos D1 e D4 são polarizados diretamente e conduzem a corrente de carga [2]. A segunda etapa ocorre durante o semiciclo negativo da fonte e temos os diodos D2 e D3 conduzindo a corrente de carga [2].

Abaixo na Figura 2, é apresentando a forma de onda da tensão de entrada ( $V_s$ ) gerada por fonte senoidal  $V_m = \sin(\omega t)$  e a forma de onda da tensão de saída ( $V_L$ )



**Figura 2 - Formas de ondas.**

**Fonte: Rashid – Eletrônica de potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações (PDF)**

A partir da integração da forma de onda é possível obter a tensão média de saída ( $V_o$ ).

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_o(\omega t) d\omega t$$

(1)

A integral apresentada acima pode ser calculada no intervalo de 0 a  $2\pi$  ou pode-se calcular no intervalo de 0 a  $\pi$  e multiplicar o resultado por 2, o método escolhido foi o segundo.

$$V_o = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{in}(\omega t) d\omega t$$

(1.1)

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{max} * \sin(\omega t) . d\omega t$$

(1.2)

$$V_o = \frac{V_{max}}{\pi} * [-\cos(\omega t)]_0^{\pi}$$

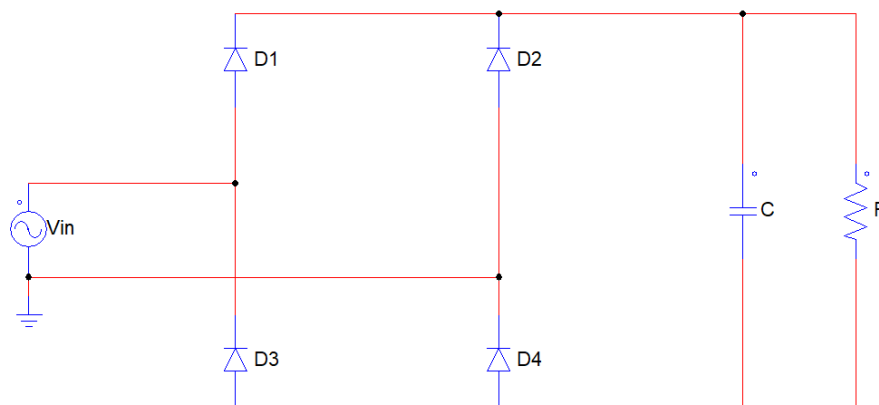
(1.3)

$$V_o = \frac{2}{\pi} * V_{max} = 0,636 * V_{max} [V]$$

(1.4)

A equação 1 mostra a tensão média obtida na carga com um retificador de onda completa do tipo ponte. Tendo conhecimento da tensão máxima aplicada, pode-se calcular o valor da tensão média de saída para qualquer valor de tensão máxima.

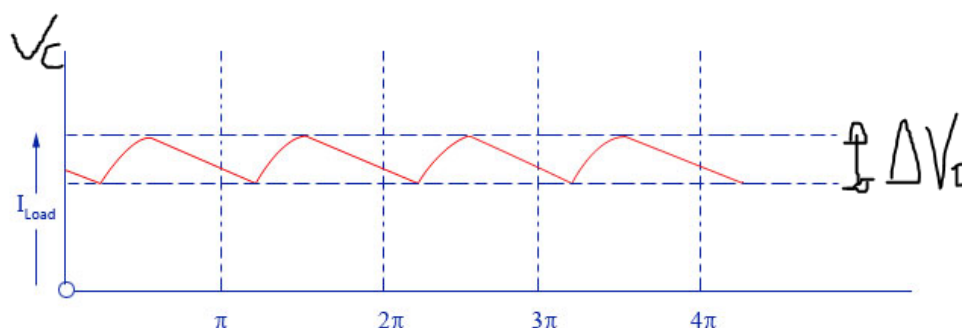
Um filtro capacitivo pode ser inserido, diminuindo a ondulação de tensão. Esse filtro capacitivo foi inserido em paralelo com o resistor, como mostra a Figura 3.



**Figura 3 – Retificador de onda completa com Filtro Capacitivo.**

Fonte: Autores

A forma de onda com o filtro capacitivo aplicado é apresentada na Figura 4. A capacitância do capacitor é calculada a partir da ondulação de tensão (ripple), ou seja, uma porcentagem da variação entre  $V_{max}$  e  $V_{min}$ .



**Figura 4 – Forma de onda na carga com filtro capacitivo.**

Fonte: Autores

A equação 2 apresenta todos os cálculos necessários até se chegar ao valor de capacitância necessário para o filtro.

$$V_{max} = V_{rede} * \sqrt{2} [V]$$

(2)

$$V_{min} = V_{max} * (1 - \Delta V_o\%)[V]$$

(2.1)

$$V_o \cong \frac{V_{max} + V_{min}}{2} [V] \quad (2.2)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} [W] \quad (2.3)$$

$$C = \frac{P_o}{f(V_{max}^2 - V_{min}^2)} [F] \quad (2.4)$$

Tendo as equações do retificador de onda completa do tipo ponte definidas, é possível prosseguir para a etapa de projeto do mesmo.

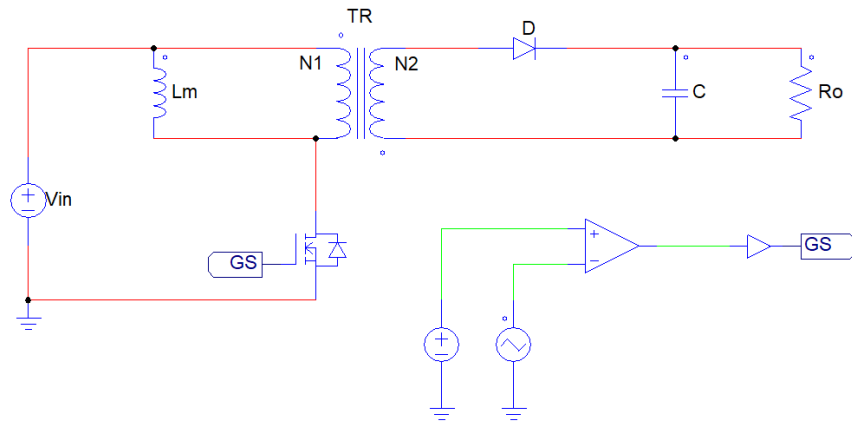
### 1.3 Conversor CC-CC Flyback

Um conversor CC-CC, conhecido também como conversor CC [3], é um circuito eletrônico que tem como função converter uma tensão ou corrente em forma contínua de determinada amplitude em uma tensão ou corrente de amplitude diferente da original.

Os conversores CC-CC possuem muitas topologias diferentes, como buck, boost, buck-boost, forward, flyback entre outros. As aplicações mais comuns para os conversores CC-CC são: Controle de velocidade de motores CC, Fontes chaveadas, Correção de fator de potência, Adaptação de tensão contínua. O conversor selecionado pelo autor para o projeto é da topologia Flyback.

O conversor Flyback é derivado do conversor CC-CC Buck-Boost, também sendo um conversor rebaixador-elevador, ele pode proporcionar altos ganhos de tensão devido ao seu indutor acoplado que é semelhante a um transformador. Porém devido à dispersão do indutor acoplado, usualmente apresenta rendimentos na faixa de 70% a 80%, limitando sua aplicação a baixas potências, inferior a 100w [4]. A Figura 5 apresenta um conversor CC-CC Flyback isolado.





**Figura 5 - Conversor Flyback Isolado.**

Fonte: Autores

Através de LKT e LCK, podemos definir as seguintes equações:

$$\frac{dil}{dt} = \frac{Vin}{Lm} \quad (3)$$

$$Vd = -(nVin + Vo) \quad (3.1)$$

$$I2 = -\frac{Il}{n} \quad (3.2)$$

$$Vl = -\frac{Vo}{n} \quad (3.3)$$

$$\frac{dil}{dt} = -\frac{Vo}{n * Lm} \quad (3.4)$$

Em regime permanente, tem-se de energia no indutor:

$$\frac{Vo}{Vin} = n * \frac{D}{1-D} \quad (4)$$

## CAPÍTULO 2 PROJETO DO RETIFICADOR E DO CONVERSOR

### 2.1 Projeto do Retificador de onda completa

Para o projeto do retificador, é necessário primeiramente calcular o valor da tensão máxima, utilizando os dados apresentados na Tabela 2 e a Equação 2, com o valor máximo de tensão é possível então calcular a tensão média na carga utilizando a Equação 1.

Tabela 2 – Especificações do projeto

Variável	Valor especificado no projeto
Tensão da rede eficaz ( $V_{in}$ )	220 V
Frequência da rede ( $f$ )	60HZ
Ondulação de tensão (ripple)	0.5%

Fonte: Autores

Todos cálculos realizados no projeto foram feitos utilizando o *software* Matlab, através de scripts elaborados pelo próprio autor. Utilizando as equações citadas e os dados apresentados, encontram-se os seguintes valores para a tensão máxima e média de saída, respectivamente:

$$V_{max} = 311.127 [V]$$

$$V_o = 197.877 [V]$$

A tensão mínima foi calculada utilizando a ondulação de tensão definida no projeto, através da Equação 2.1.

$$V_{min} = 309.571 [V]$$

O valor de capacitância para o capacitor de filtro é definido pela Equação 2.4. Utilizando a equação e os valores apresentados na Tabela 1 e 2 temos o seguinte resultado:

$$C = 1.4 [mF]$$

Para a especificação dos diodos utilizados no retificador, é necessário saber a tensão máxima do diodo e a corrente média, a Equação 5 e Equação 6 foram utilizadas para o cálculo, respectivamente. Para a tensão, foi utilizado um fator de segurança de 50%

$$V_{dmax} = V_{max} * 1.5$$

(5)

$$I_{dmed} = \frac{V_{max}}{\pi * R_o}$$

(6)

Substituindo os valores nas equações tem-se os seguintes resultados:

$$V_{dmax} = 466.690 [V]$$

$$I_{dmed} = 0.082 [A]$$

A fim de especificar os *part number* comercial para os diodos foi utilizado os valores encontrados através da Equação 5 e Equação 6. Com esses valores foi selecionado o diodo do fabricante Diotec Semiconductor, com *part number* 1N4005 [5], que possui uma  $V_{dmax}$  600V e  $I_{dmed}$  de 1A.

## 2.2 Projeto do Conversor CC-CC Flyback

Após a etapa de projeto do Retificador ser concluída, passou-se para a etapa de projeto do Conversor CC-CC Flyback, nessa etapa será apresentado o cálculo dos valores do indutor e do capacitor de filtro. A esquemática de um conversor CC-CC Flyback já foi apresentada na Figura 5.

Os parâmetros especificados para o projeto são apresentados na Tabela 3. O valor da razão cíclica foi escolhido pelo autor [6]

**Tabela 3 - Especificações do projeto do Conversor**

<b>Variável</b>	<b>Valor especificado no projeto</b>
Potência de Saída ( $P_o$ )	80 W
Tensão de Saída ( $V_o$ )	6000 V
Frequência de Chaveamento ( $F_s$ )	1.8 kHz
Ondulação de Tensão ( $\Delta V_o\%$ )	2%
Ondulação de corrente ( $\Delta I_L\%$ )	15%
Razão cíclica (D)	0.7

**Fonte: Autores**

Primeiramente foi calculado o número de espiras do transformador, através da equação 7. Essa equação nos mostra a relação do número de espiras no secundário, caso o número de espiras da primeira for igual a 1. Para o projeto foi adotado o número de espiras no primário igual a 1. Assim como no projeto do retificador, para o projeto do conversor, também foi utilizado o software Matlab para as rotinas de cálculos, através de scripts elaborados pelo próprio autor.

$$n = \frac{V_o}{V_{cc}} * \frac{1-D}{D}$$

(7)

O segundo passo é calcular a resistência de carga, através da Equação 8. Também é necessário calcular a corrente média da carga, através da Equação 9.

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} [\Omega]$$

(8)

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} [A]$$

(9)

Tendo o valor da corrente média de carga, é possível calcular a corrente média no indutor, entretanto ainda é necessário a corrente média de entrada, calculada através da Equação 11. Para o cálculo da corrente média de entrada é necessário a potência de entrada, como especificado no projeto, os componentes são ideais, ou seja, a potência de entrada é igual a de saída, conforme a Equação 10.

$$P_{in} = P_{out} [W]$$

(10)

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{cc}} [A]$$

(11)

A corrente média no indutor é calculada através da Equação 12. Com o valor da corrente média no indutor, podemos calcular a ondulação da corrente no indutor, conforme a Equação 13. Para o cálculo da ondulação de corrente no capacitor, é utilizado a Equação 14.

$$I_L = I_{in} + I_o * n [A]$$

(12)

$$\Delta I_L = \Delta i_L * I_L [A]$$

(13)

$$\Delta V_O = \Delta V_o * V_o [V]$$

(14)

Com todos os valores já calculados, é possível então partir para o cálculo da indutância do indutor e da capacitância do capacitor, conforme a Equação 15 e Equação 16, respectivamente.

$$L = \frac{V_{cc} * D}{\Delta I_L * f_s} [H]$$

(15)

$$C = \frac{I_o * D}{\Delta VO * f_s} [F]$$

(16)

Todos os resultados obtidos através das equações descritas acima, são demonstrados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Resultados do projeto do Conversor**

Variável	Resultado
n	8.264
Ro	450 [kΩ]
Io	0.013 [A]
Iin	0.257 [A]
Il	0.367 [A]
$\Delta IL$	0.055 [A]
$\Delta VO$	120 [V]
Lm	2.195 [H]
C	43.21 [nF]

Para a especificação do diodo do Conversor, é necessário utilizar a Equação 17 e Equação 18. Já para o mosfet do conversor, é necessário utilizar a Equação 19 e Equação 20. Esses cálculos são necessários, pois a partir dos valores obtidos nele, é que se pode procurar um diodo e um mosfet compatível com a aplicação. Para os valores de tensão foi aplicado um fator de segurança de 50%.

$$V_{dmax} = V_o * 1.5 [V]$$

(17)

$$I_d = \frac{V_o}{R_o} [A]$$

(18)

$$V_{dss} = V_{max} * 1.5 [V]$$

(19)

$$I_s = I_L [A]$$

(20)

Substituindo os valores nas equações tem-se os seguintes resultados:

$$V_{dmax} = 9000 [V]$$

$$I_d = 0.013 [A]$$

$$V_{dss} = 466.690 [V]$$

$$I_s = 0.367 [A]$$

Como já citado antes, os valores acima foram utilizados para definir o part number do diodo e do mosfet. O diodo selecionado foi o DV10P [7] da empresa Dean Technology e o mosfet o FDD6N50TM-F085 [8] da empresa OnSemi. Ambos satisfazem os requisitos de projeto.

## CAPÍTULO 3 SIMULAÇÕES

### 3.1 Simulação do retificador de onda completa

Para as simulações tanto do retificador quanto do conversor, deve-se primeiro calcular os parâmetros de simulação que serão utilizados no *software* PSIM. A licença estudantil do PSIM possui uma limitação de 6000 pontos por período, ou seja, os tempos de simulação não podem ultrapassar esse valor. Para a simulação do retificador foi utilizado uma resolução de 1000 pontos por período, o que nos leva aos seguintes parâmetros:

$$T_s = 55.4 \text{ [ms]}$$

$$Time_{Step} = 55.6 \text{ [us]}$$

$$Total_{Time} = 0.667 \text{ [s]}$$

$$Start_{Time} = 0.664 \text{ [s]}$$

Utilizando os valores obtidos no Capítulo 2, foi possível realizar as simulações. O primeiro gráfico a ser plotado foi a tensão de entrada pela tensão de saída ( $V_{in} \times V_{cc}$ ), conforme mostra a figura 6.

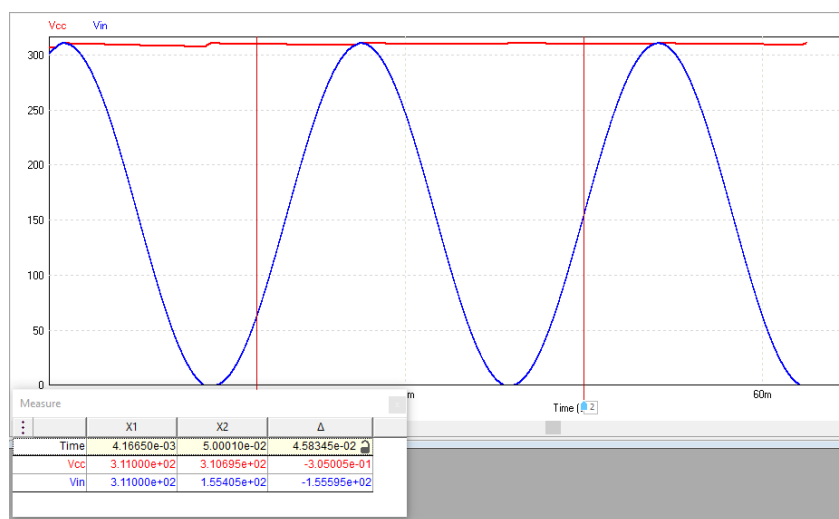


Figura 6 - Gráfico Vin x Vcc.

Fonte: Autores



A Figura 6 comprova que o retificador está funcionando como deve, transformando uma tensão máxima de 311V alterna em uma tensão contínua de 311V.

O próximo gráfico a ser plotado foi o da corrente drenada pela fonte de tensão, a onda da corrente é apresentada na Figura 7.



**Figura 7 - Corrente drenada pela fonte.**

Fonte: Autores

Utilizando o software PSIM, foi calculado o fator de potência e a THD da corrente suprimida pela rede. Os resultados são demonstrados na Figura 8 e de uma forma mais simples na Tabela 5.

Measure						
	X1	X2	Δ	PF	THD	
Time	1.66670e-02	3.33330e-02	1.66660e-02		freq=200	
I1	1.70537e-08	1.70537e-08	2.61932e-16	1.67842e-01	2.85057e+00	
V3	1.54577e+02	1.54998e+02	4.20709e-01		1.38314e+00	

**Figura 8 - Fator de potência e THD**

Fonte: Autores

**Tabela 5 – Fator de potência e THD**

Variável	Valor calculado
Fator de potência (Fp)	0.167
THD% ( <i>total harmonic distortion</i> )	285%

Fonte: Autores

A fim de realizar uma averiguação dos dados, foi montada a Tabela 6, a fim de comparar os valores obtidos no projeto e os valores obtidos através da simulação.

**Tabela 6 – Comparação Projeto x Simulação**

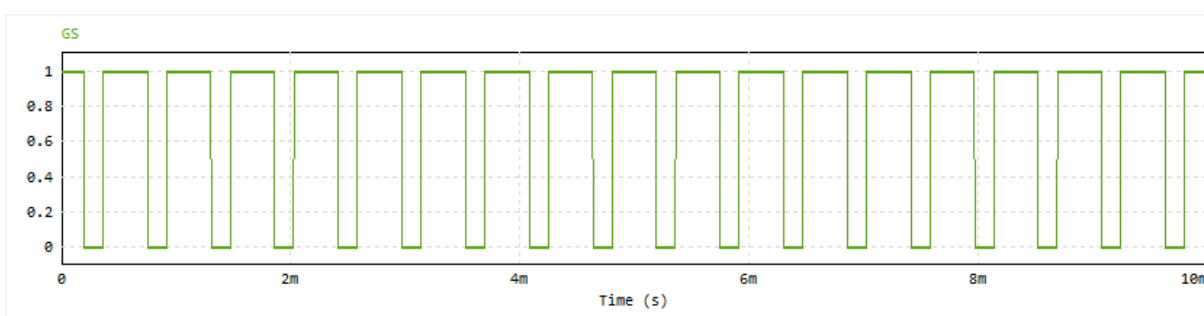
Variavel	Valor de projeto	Valor de simulação	Erro %
Vcc	311.12	311.000	0.038
$\Delta V_{cc} \%$	0.5	0.514	2.723

Fonte: Autores

### 3.2 Simulação do conversor CC-CC Flyback

Para a simulação do conversor CC-CC Flyback será usado os mesmos parâmetros e resolução utilizados no retificador.

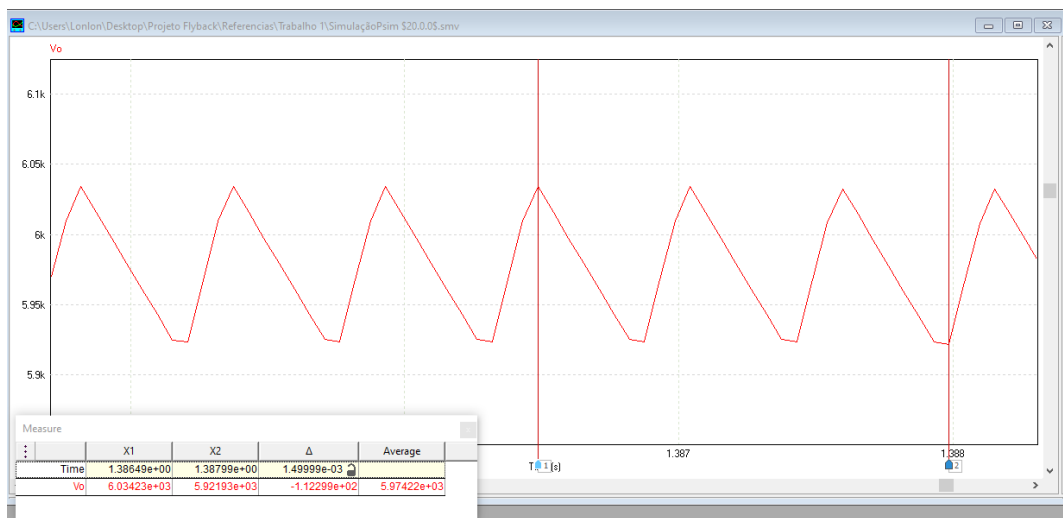
Tomando os dados obtidos no capítulo 2, foi possível realizar as simulações. O primeiro gráfico visualizado é o da forma de onda da tensão de chaveamento do diodo mosfet ( $G_s \times t$ ), como mostrado na Figura 9.



**Figura 9 - Forma de onda da tensão de chaveamento do diodo mosfet.**

Fonte: Autores

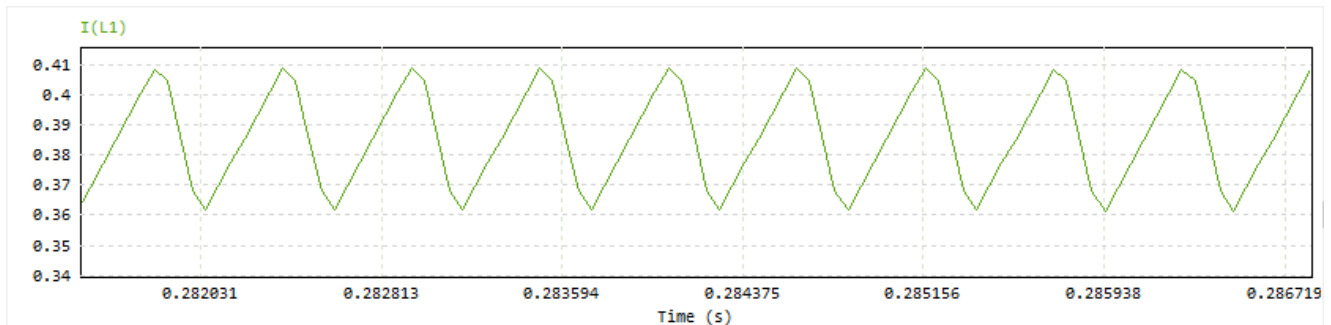
Na Figura 10 é plotado a forma de onda da tensão de saída do conversor  $V_o$  obtido em regime permanente de operação.



**Figura 10 - Forma de onda da tensão de saída.**

**Fonte: Autores**

O último gráfico a ser visualizado e analisado para a verificação do projeto do conversor é a corrente do indutor  $I_L$  mostrado na Figura 11



**Figura 11 - Forma de onda da corrente do indutor**

**Fonte: Autores**

Agora para fins comparativos foram reunidos todos os dados do conversor tanto de projeto quanto simulado na Tabela 7 para verificar e validar através dos erros relativos ao projeto realizado.

Tabela 7 - Comparação Projeto x Simulação

Variável	Valor de projeto	Valor de simulação	Erro %
$V_0$	6000	5974.22	0.4315%
$\Delta_{v_0}\%$	2.0%	1.8797%	6.3999%
$\Delta_{i_L}\%$	15%	11.577%	22.814%

Fonte: Autores

## **CAPÍTULO 4      CONCLUSÃO**

O relatório presente teve como objetivo validar o estudo teórico de retificadores de onda completa e conversores CC-CC Flyback através de simulações, a fim de comparar resultados obtidos na etapa de projeto e resultados obtidos na etapa de simulação.

Acredita-se que o conversor projetado alcançou um desempenho dentro do esperado, tendo em vista que os erros percentuais foram baixos, conforme a Tabela 6 e Tabela 7. Caso fosse uma aplicação prática e não um estudo, acredita-se que os erros seriam maiores, devido ao fato de os componentes não serem ideais.

A maior dificuldade foi encontrada na hora de selecionar os componentes para aplicação. Outra dificuldade foi referente a parte da análise de dados da simulação.

Através do trabalho foi possível entender o funcionamento do retificador e de um conversor, o comportamento das ondas e também como selecionar componentes para uma aplicação prática. O trabalho se demonstrou muito agregado aos conhecimentos dos autores, pois para a realização do mesmo foi necessário a revisão de aulas e bibliografias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BELTRAME, R. C. APRESENTAÇÃO DA DISCIPLINA E DEFINIÇÕES BÁSICAS

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5NfAVZ2s2p8>>

[2] BARBI, IVO. ELETTRÔNICA DE POTÊNCIA – 6º EDIÇÃO

[3] PEREIRA, H. A. CONVERSORES CC-CC

Disponível

em:

<[https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula\\_06-ELT-313-Conversores-CC-CC.pdf](https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula_06-ELT-313-Conversores-CC-CC.pdf)>

[4] BELTRAME, R. C. CONVERSOR CC-CC FLYBACK

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PCZZHFilgqI&feature=youtu.be>>

[5] ALLDATASHEET. Datasheet do diodo IN4005.

Disponível

em:

<

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/223362/DEC/1N4005.html>>

[6] BELTRAME, R. C. SIMULAÇÃO: CONVERSOR CC-CC FLYBACK

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PCZZHFilgqI&feature=youtu.be>>

[7] ASSETS.DEANTECHNOLOGY. Datasheet do diodo DV10P

Disponível

em

<

[https://assets.deantechnology.com/resources/30390/attachments/original/D-DV\\_Series\\_REV\\_2.0.pdf?1642363775](https://assets.deantechnology.com/resources/30390/attachments/original/D-DV_Series_REV_2.0.pdf?1642363775)>

[8] ALLDATASHEET. Datasheet do mosfet FDD6N50TMF085

Disponível

em:

<<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/581974/FAIRCHILD/FDD6N50TMF085.html>>