

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

Jade Oumura Melo

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO EMPREGO DE CAPACITORES CERÂMICOS EM  
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Florianópolis  
2020



Jade Oumura Melo

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO EMPREGO DE CAPACITORES CERÂMICOS EM  
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica  
Orientador: Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Florianópolis  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Melo, Jade Oumura

Introdução ao estudo do emprego de capacitores cerâmicos  
em eletrônica de potência / Jade Oumura Melo ; orientador,  
Ivo Barbi, 2020.

139 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Capacitor Cerâmico. 3.  
Eletrônica de Potência. 4. Capacitância variável. I. Barbi,  
Ivo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação  
em Engenharia Elétrica. III. Título.

Jade Oumura Melo

## INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO EMPREGO DE CAPACITORES CERÂMICOS EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 14 de novembro de 2020.



Documento assinado digitalmente

Jean Vianeí Leite

Data: 27/11/2020 09:54:51-0300

CPF: 003.474.909-80

---

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:** IVO

Barbi:0778790193

4

Assinado de forma digital  
por Ivo Barbi:07787901934  
Dados: 2020.11.19  
19:00:29 -03'00'

---

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Hugo Rolando Estofanero Larico

Data: 25/11/2020 13:07:45-0300

CPF: 010.874.679-85

---

Prof. Hugo Rolando Estofanero Larico, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Victor Luiz Flor Borges

Data: 25/11/2020 13:31:40-0300

CPF: 079.868.989-76

---

Eng. Eletric. Victor Luiz Flor Borges, MSc.

Instituto Brasileiro de Eletrônica de Potência e Energias Renováveis



Este trabalho é dedicado aos meus avós, aos meus queridos pais.







## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Rosana e Francisco, e à minha irmã Yasmin pelo apoio em todos os momentos nesta jornada acadêmica.

A todos os amigos e colegas que participaram e me ajudaram na graduação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por me acolher e me proporcionar além de anos de aprendizado, amigos que levarei para vida.

Agradeço toda a população brasileira que pagaram meus estudos em uma universidade pública.

Ao meu orientador Ivo Barbi, por me aceitar como sua orientanda e me ajudar sempre da melhor maneira possível na minha formação acadêmica.

À toda equipe do IBEPE – Inst. Bras. de Eletrônica de Potência e Energias Renováveis, por me acolher como parte da equipe, proporcionando-me um excelente estágio profissionalizante.

Aos engenheiros Victor e Guilherme, que me guiaram e me ajudaram na realização deste trabalho.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos.





## RESUMO

O aumento da demanda de equipamentos elétricos e eletrônicos impulsionou os estudos do uso de capacitores. Existem diversos materiais que podem ser utilizados como dielétricos em capacitores, a cerâmica é um dos mais utilizados. Dentro desse contexto, este trabalho buscou estudar o uso dos capacitores cerâmicos classe II na área de eletrônica de potência. Primeiramente foi feita uma revisão teórica dos principais tipos de capacitores utilizados. Após isso, foi desenvolvido, testado e validado um método para a medição de capacitância de capacitores cerâmicos classe II. Por fim, foi testado um circuito com capacitância variável controlável em um retificador de onda completa. Os resultados demonstraram que é possível utilizar os capacitores cerâmicos classe II para se construir um capacitor com capacitância variável controlável para aplicação em uma fonte de tensão variável.

**Palavras-chave:** Capacitor cerâmico. Eletrônica de Potência. Capacitância variável.



## **ABSTRACT**

The increased demand for electrical and electronic equipment has boosted studies on the use of capacitors. There are several materials that can be used as dielectrics in capacitors, ceramic is one of the most used. Within this context, this work studied the use of class II ceramic capacitors in the field of power electronics. First, a theoretical review of the main types of capacitors used was made. After that, a method for measuring capacitance of class II ceramic capacitors was developed, tested and validated. Finally, a circuit with controllable variable capacitance was tested on a full wave rectifier. The results showed that it's possible to use class II ceramic capacitors to build a circuit with variable controllable capacitance for application in a variable voltage source.

**Keywords:** Ceramic Capacitor. Power Electronics. Variable capacitance.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Intervalo de capacitância por dielétrico .....	29
Figura 2 – Visão geral dos capacitores.....	30
Figura 3 – Conversor <i>Buck</i> .....	35
Figura 4 – Conversor <i>Buck</i> com a chave <i>SI</i> fechada .....	36
Figura 5 – Conversor <i>Buck</i> com a chave aberta .....	36
Figura 6 – Principais formas de onda do conversor <i>Buck</i> .....	37
Figura 7 – Principais formas de onda do conversor <i>Buck</i> (continuação).....	38
Figura 8 – Conversor <i>Forward</i> .....	39
Figura 9 – Conversor <i>Forward</i> na primeira etapa.....	39
Figura 10 – Conversor <i>Forward</i> na segunda etapa .....	40
Figura 11- Conversor <i>Forward</i> na terceira etapa .....	40
Figura 12 – Principais formas de onda do conversor <i>Forward</i> .....	41
Figura 13 – Principais formas de onda do conversor <i>Forward</i> (continuação).....	42
Figura 14 – Medição da capacitância no conversor <i>Buck</i> .....	43
Figura 15 – Conversor <i>Forward</i> - diagrama esquemático .....	45
Figura 16 – Conversor <i>Forward</i> – protótipo construído .....	45
Figura 17 – Pontos de medição .....	46
Figura 18 – Conversor <i>Buck</i> - protótipo construído .....	47
Figura 19 – Conversor <i>Buck</i> construído no simulador <i>PSIM</i> ® .....	47
Figura 20 – Relação da capacitância com a tensão do capacitor de poliéster de 470 nF .....	48
Figura 21 - Relação da capacitância com a tensão do capacitor de poliéster de 1 $\mu$ F .....	48
Figura 22 – Relação da capacitância com a tensão do capacitor cerâmico.....	49
Figura 23 – Circuito do capacitor variável controlável.....	51
Figura 24 – Placa 1 - Banco de capacitores com capacitância variável controlável .....	52
Figura 25 – Placa 2 – Banco de capacitores com capacitância variável controlável .....	52
Figura 26- Capacitância experimental e teórica do capacitor variável vs. tensão de controle ( $V_c$ )...53	53
Figura 27 – Retificador com capacitor série .....	55
Figura 28 – Principais formas de onda do retificador de onda completa com capacitor série .....	56
Figura 29 – Circuito completo do retificador com capacitor variável controlável série.....	58
Figura 30 – Foto da placa do retificador com o capacitor variável controlável Placa1 .....	58
Figura 31 – Retificador construído no simulador <i>PSIM</i> ® .....	59
Figura 32 – Placa 1 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ).....	61
Figura 33 – Placa 1 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ ) .....	62
Figura 34 – Placa 1 - Erro absoluto dos resultados simulados com os teóricos.....	63
Figura 35 – Placa 2 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ).....	64
Figura 36 – Placa 2 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ ) .....	67
Figura 37 – Placa 2 - Erro absoluto dos resultados simulados com os teóricos.....	69
Figura 38 – Placa 1 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ) .....	71
Figura 39 – Placa 1 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ ) .....	71
Figura 40 – Placa 1 - Gráfico comparando os valores teóricos com o resultado experimental: Tensão de Saída ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ) .....	72
Figura 41 – Placa 1- Erro absoluto dos resultados experimentais com os teóricos .....	73
Figura 42 – Placa 2 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ) .....	75

Figura 43 – Placa 2 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ ).....	76
Figura 44 - Placa 2 - Gráfico comparando os valores teóricos com o resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ ) .....	77
Figura 45 – Placa 2- Erro absoluto dos resultados experimentais com os teóricos .....	78
Figura 46 - Capacitância em função da tensão CC.....	83
Figura 47 - Capacitância em função da tensão CC.....	84
Figura 48 – Curva da variação da indutância pela frequência do indutor de saída ( $L_o$ ) do protótipo do conversor Buck .....	97
Figura 49 – Curva da variação da indutância pela frequência do indutor de entrada ( $L_i$ ) do protótipo do conversor Buck .....	99
Figura 50 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com $V_{in} = 20$ V .....	103
Figura 51- Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF com $V_{in} = 20$ V .....	103
Figura 52 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 20$ V/ Cursor de tensão .....	104
Figura 53 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 20$ V/ Cursor de corrente .....	104
Figura 54 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com $V_{in} = 40$ V .....	105
Figura 55- Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF com $V_{in} = 20$ V .....	105
Figura 56 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de corrente .....	106
Figura 57 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de tensão .....	106
Figura 58 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com $V_{in} = 60$ V .....	106
Figura 59 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 60$ V/ Cursor de corrente .....	107
Figura 60 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/ $V_{in} = 60$ V/ Cursor de tensão .....	107
Figura 61 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F com $V_{in} = 20$ V .....	108
Figura 62 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 20$ V/ Cursor de tensão.....	108
Figura 63 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 20$ V/ Cursor de corrente .....	109
Figura 64 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F com $V_{in} = 40$ V .....	109
Figura 65 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de tensão.....	110
Figura 66 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de corrente .....	110
Figura 67 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F com $V_{in} = 60$ V .....	110
Figura 68 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 60$ V/ Cursor de tensão.....	111
Figura 69 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 $\mu$ F/ $V_{in} = 60$ V/ Cursor de corrente .....	111
Figura 70 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 10$ V/ Cursor de tensão.....	112
Figura 71 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 10$ V/ Cursor de corrente.....	112
Figura 72 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 16$ V/ Cursor de tensão.....	113
Figura 73 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 16$ V/ Cursor de corrente.....	113
Figura 74 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 25$ V/ Cursor de tensão.....	114
Figura 75 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 25$ V/ Cursor de corrente.....	114
Figura 76 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 30$ V/ Cursor de tensão.....	114
Figura 77 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 30$ V/ Cursor de corrente.....	115
Figura 78 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de tensão.....	115
Figura 79 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 40$ V/ Cursor de corrente.....	115
Figura 80 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 50$ V/ Cursor de tensão.....	116
Figura 81 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 50$ V/ Cursor de corrente.....	116
Figura 82 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 65$ V/ Cursor de tensão.....	117
Figura 83 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 65$ V/ Cursor de corrente.....	117
Figura 84 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 80$ V/ Cursor de tensão.....	117
Figura 85 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 80$ V/ Cursor de corrente.....	118
Figura 86 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 100$ V/ Cursor de tensão.....	118
Figura 87 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 $\mu$ F/ $V_{in} = 100$ V/ Cursor de corrente.....	118





## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados técnicos do capacitor CGA9N2X7R2A475K230KA.....	83
Quadro 2 – Dados técnicos do capacitor C1206C106K4RAC7800.....	84



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constante Dielétrica dos materiais comumente utilizados .....	29
Tabela 2 – Nomenclatura capacitores Classe I.....	32
Tabela 3 – Nomenclatura capacitores Classe II .....	32
Tabela 4 – Especificação da capacitância pela tensão .....	49
Tabela 5 – Relação da capacitância equivalente do banco (Placa 1) com a tensão de controle $V_c$ ...	54
Tabela 6 - Placa 1 - Tensão de Saída Corrigida Teórica - <i>Vocorrigida</i> - (V) .....	60
Tabela 7 – Placa 1 – Corrente de Saída Teórica - $I_o$ - (A).....	60
Tabela 8 – Placa 1 - Tensão de Saída Corrigida Simulada - <i>Vocorrigida</i> - (V).....	63
Tabela 9- Placa 2 -Tensão de Saída Corrigida Teórica - <i>Vocorrigida</i> - (V) .....	65
Tabela 10 - Placa 2 – Corrente de Saída Teórica - $I_o$ - (A).....	66
Tabela 11 – Placa 2 -Tensão de Saída Corrigida Simulada - <i>Vocorrigida</i> - (V).....	68
Tabela 12 - Placa 1 – Valor Médio da Tensão de Saída - $V_o$ - (V).....	70
Tabela 13 – Placa 1 – Valor Médio da Corrente de Saída - $I_o$ - (A).....	70
Tabela 14- Placa 2 -Valor Médio da Tensão de Saída - $V_o$ - (V) .....	74
Tabela 15 - Placa 2 – Valor Médio da Corrente de Saída - $I_o$ - (A) .....	75
Tabela 16 – Capacitância em função da tensão DC do capacitor <i>CGA9N2X7R2A475K230KA</i> .....	83
Tabela 17 – Capacitância em função da tensão DC do capacitor <i>C1206C106K4RAC7800</i> .....	85
Tabela 18 – Conversor Forward – Parâmetros para o dimensionamento do interruptor .....	91
Tabela 19 – Conversor <i>Forward</i> - Parâmetros para o dimensionamento do dissipador do interruptor .....	91
Tabela 20 – Conversor Forward – Dimensionamento dos diodos $D_1$ , $D_{RL}$ e $D_3$ .....	92
Tabela 21 – Conversor Forward – Dimensionamento do diodo $D_g$ .....	94
Tabela 22 – Conversor Forward – Parâmetros para o dimensionamento do interruptor .....	100
Tabela 23 – Conversor Forward - Parâmetros para o dimensionamento do dissipador do interruptor .....	100
Tabela 24 – Conversor Forward – Dimensionamento do diodo $D_{RL}$ .....	101
Tabela 25 – Dados de referência de tensão e capacitância do capacitor cerâmico a ser medido.....	112
Tabela 26 – Módulo da Reatância Capacitiva do Capacitor de Entrada ( $X$ ).....	119
Tabela 27 – Tensão de Saída – $V_o$ - (V).....	119
Tabela 28 – Ondulação ( $r$ ) .....	120
Tabela 29 – Tensão de Saída Corrigida – $V_{oc}$ – (V).....	120
Tabela 30 – Variação da Tensão de Saída - $\Delta V_o$ – (V) .....	121
Tabela 31 - Módulo da Reatância Capacitiva do Capacitor de Entrada ( $X$ ) .....	122
Tabela 32 - Tensão de Saída – $V_o$ - (V).....	123
Tabela 33 - Ondulação ( $r$ ) .....	124
Tabela 34 - Tensão de Saída Corrigida – $V_{oc}$ – (V).....	125
Tabela 35 - Variação da Tensão de Saída - $\Delta V_o$ – (V).....	126





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AWG</i>	American Wire Gauge
<i>A</i>	Ampere
<i>A<sub>e</sub></i>	Área da seção central do núcleo de Ferrite
<i>A<sub>w</sub></i>	Área da janela do carretel
<i>A<sub>wmin</sub></i>	Área mínima da janela do carretel
<i>S<sub>Li</sub></i>	Área de cobre no indutor Li
<i>S<sub>Lo</sub></i>	Área de cobre no indutor Lo
<i>S<sub>pri</sub></i>	Área de cobre no primário de um transformador
<i>S<sub>sec</sub></i>	Área de cobre no secundário de um transformador
<i>S<sub>ter</sub></i>	Área de cobre no terciário de um transformador
<i>S<sub>AWG21</sub></i>	Área do condutor AWG 21 ( $5,004 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ )
<i>S<sub>AWG22</sub></i>	Área do condutor AWG 22 ( $4,013 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ )
<i>S<sub>AWG23</sub></i>	Área do condutor AWG 23 ( $3,221 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ )
<i>S<sub>AWG29</sub></i>	Área do condutor AWG 29 ( $8,72 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ )
<i>S<sub>AWG38</sub></i>	Área do condutor AWG 38 ( $1,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ )
<i>C</i>	Capacitor
<i>C<sub>g</sub></i>	Capacitor do circuito de grampeamento
<i>C<sub>e</sub></i>	Capacitor do filtro de entrada
<i>C<sub>o</sub></i>	Capacitor do filtro de saída
<i>C<sub>B</sub></i>	Capacitor em estrutura de ponte
<i>C<sub>eq</sub></i>	Capacitância equivalente
<i>C<sub>i</sub></i>	Capacitor série de entrada
<i>R<sub>o</sub></i>	Carga resistiva
<i>S<sub>l</sub></i>	Chave
<i>D</i>	Ciclo de trabalho
<i>l<sub>espira</sub></i>	Comprimento médio de uma espira
<i>κ</i>	Constante dielétrica
<i>i</i>	Corrente
<i>i<sub>i</sub></i>	Corrente de entrada
<i>i<sub>Ro</sub></i>	Corrente na carga resistiva
<i>i<sub>S</sub></i>	Corrente na chave
<i>i<sub>Ce</sub></i>	Corrente no capacitor do filtro de entrada
<i>i<sub>Co</sub></i>	Corrente no capacitor de saída
<i>i<sub>D1</sub></i>	Corrente no diodo D <sub>1</sub>
<i>i<sub>D3</sub></i>	Corrente no diodo D <sub>3</sub>
<i>i<sub>DRL</sub></i>	Corrente no diodo de roda livre
<i>i<sub>LE</sub></i>	Corrente no indutor do filtro de entrada
<i>i<sub>Lo</sub></i>	Corrente no indutor do filtro de saída
<i>i<sub>N2</sub></i>	Corrente no segundo enrolamento do transformador
<i>cos(x)</i>	Cosseno de x
<i>DC, CC</i>	Corrente contínua
<i>AC</i>	Corrente alternada
<i>B<sub>máx</sub></i>	Densidade máxima de campo magnético
<i>J<sub>máx</sub></i>	Densidade máxima de corrente
<i>dv(t)/dt</i>	Derivada em relação ao tempo da função da tensão v(t)
<i>D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub></i>	Diodo
<i>D<sub>RL</sub></i>	Diodo de roda livre
<i>D<sub>g</sub></i>	Diodo do circuito de grampeamento

<i>ESR</i>	<i>Equivalent Series Resistance</i>
<i>W<sub>off</sub></i>	Energia dissipada no Turn-Off da chave
<i>W<sub>on</sub></i>	Energia dissipada no Turn-On da chave
<i>F</i>	Farad
<i>tanδ</i>	Fator de dissipação
<i>α<sub>Rd</sub></i>	Fator de correção do R <sub>DSon</sub>
<i>k<sub>w</sub></i>	Fator de utilização
<i>k<sub>p</sub></i>	Fator de utilização do primário
<i>f</i>	Frequência
<i>f<sub>s</sub></i>	Frequência de chaveamento da chave S <sub>1</sub>
<i>f<sub>e</sub></i>	Frequência de corte do filtro de entrada
<i>f<sub>max</sub></i>	Frequência máxima de chaveamento
<i>i(t)</i>	Função da corrente em relação ao tempo
<i>i<sub>i</sub>(t)</i>	Função da corrente de entrada em relação ao tempo
<i>v<sub>i</sub>(t)</i>	Função da tensão de entrada em relação ao tempo
<i>v<sub>C</sub>(t)</i>	Função da tensão no capacitor série de entrada em relação ao tempo
<i>v<sub>br</sub>(t)</i>	Função da tensão na ponte de diodos em relação ao tempo
°C	Graus Celsius
<i>H</i>	Henry
<i>Hz</i>	Hertz
<i>L</i>	Indutor
<i>L<sub>e</sub>, L<sub>i</sub></i>	Indutor do filtro de entrada
<i>L<sub>o</sub></i>	Indutor do filtro de saída
<i>l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>, l<sub>3</sub></i>	Indutâncias de dispersão do transformador
<i>Log<sub>10</sub>(x)</i>	Logaritmo de x na base 10
<i>mF</i>	Milifarads (10 <sup>-3</sup> F)
<i>μF</i>	Microfarads (10 <sup>-6</sup> F)
<i>PWM</i>	Modulação por Largura de Pulso
<i>N<sub>1</sub>, N<sub>pri</sub></i>	Número de enrolamentos no primário de um transformador
<i>N<sub>2</sub>, N<sub>sec</sub></i>	Número de enrolamentos no secundário de um transformador
<i>N<sub>3</sub>, N<sub>ter</sub></i>	Número de enrolamentos no terciário de um transformador
<i>N<sub>Lo</sub></i>	Número de espiras do indutor L <sub>o</sub>
<i>N<sub>Le</sub></i>	Número de espiras do indutor L <sub>e</sub>
<i>n<sub>condutores</sub></i>	Número total de condutores
<i>n<sub>condpri</sub></i>	Número total de condutores no primário de um transformador
<i>n<sub>condsec</sub></i>	Número total de condutores no secundário de um transformador
<i>n<sub>condter</sub></i>	Número total de condutores no terciário de um transformador
Ω	Ohm
<i>r</i>	Ondulação
<i>ppm</i>	Partes por milhão
<i>T</i>	Período
<i>P<sub>com</sub></i>	Perda de comutação
<i>P<sub>cond</sub></i>	Perda de condução
<i>P<sub>Licobre</sub></i>	Perda relacionada a resistência do enrolamento do indutor L <sub>i</sub>

$P_{Linúcleo}$	Perda magnética no núcleo do indutor $L_i$
$P_{Locobre}$	Perda relacionada a resistência do enrolamento do indutor $L_o$
$P_{Lonúcleo}$	Perda magnética no núcleo do indutor $L_o$
$P_{cobre\_pri}$	Perda relacionada a resistência do enrolamento no primário de um transformador
$P_{cobre\_sec}$	Perda relacionada a resistência do enrolamento no secundário de um transformador
$PR_{cobre\_ter}$	Perda relacionada a resistência do enrolamento no terciário de um transformador
$P_{Tnúcleo}$	Perda magnética no núcleo do transformador
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar no vácuo
$\pi$	pi
$pF$	Picofarads ( $10^{-12}$ F)
$P$	Potência
$P_{Co}$	Potência consumida pelo capacitor $C_o$
$P_{loss}$	Potência consumida por um diodo
$P_g$	Potência dissipada no grampeamento
$P_{S.TOTAL}$	Potência total dissipada na chave S
$pcb$	<i>Printed circuit board</i>
$kV$	Quilovolts ( $10^3$ V)
$X$	Reatância capacitiva
$n$	Relação de espiras do primário e o secundário de um transformador
$R_{Locobre}$	Resistência do enrolamento do indutor $L_o$
$R_{cobre\_pri}$	Resistência do enrolamento no primário de um transformador
$R_{cobre\_sec}$	Resistência do enrolamento no secundário de um transformador
$R_{cobre\_ter}$	Resistência do enrolamento no terciário de um transformador
$R_d$	Resistência equivalente do diodo
$R_{t\_E4215}$	Resistência térmica do núcleo E4215
$R_{t\_E3014}$	Resistência térmica do núcleo E3014
$R_{t\_E55}$	Resistência térmica do núcleo E55
$R_{Th,jc}$	Resistência térmica junção-cápsula
$R_{Th,cd}$	Resistência térmica cápsula-dissipador
$R_{Th,da}$	Resistência térmica dissipador-ambiente
$R_{Th,ja}$	Resistência térmica junção-ambiente
$\rho_{AWG21}$	Resistividade de um fio AWG 21
$\rho_{AWG22}$	Resistividade de um fio AWG 22
$\rho_{AWG23}$	Resistividade de um fio AWG 23
$\rho_{AWG29}$	Resistividade de um fio AWG 29
$\rho_{AWG38}$	Resistividade de um fio AWG 38
$R_g$	Resistor de grampeamento
$R_B$	Resistores em estrutura de ponte
$s$	Segundo
$t$	Tempo
$t_a$	Tempo que a chave permanece aberta
$t_C$	Tempo de condução da chave
$t_f$	<i>Turn-Off Fall Time</i>
$t_r$	<i>Turn-On Rise Time</i>
$T_{j,S}$	Temperatura de junção da chave
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$v$	Tensão

$V_C$	Tensão de controle
$V_i, V_{in}$	Tensão de entrada
$V_g$	Tensão de grampeamento
$v_O$	Tensão de saída
$v_{br}$	Tensão na ponte de diodos
$V_{To}$	Tensão reversa no diodo
$v_S$	Tensão sobre a chave
$v_{CE}$	Tensão sobre o capacitor do filtro de entrada
$v_{DI}$	Tensão sobre o diodo de roda livre
$v_{Lo}$	Tensão sobre o indutor de saída
$V_D$	Tensão <i>threshold</i> do diodo
$I_i$	Valor médio da corrente de entrada
$I_o$	Valor médio da corrente de saída
$I_{Ro}$	Valor médio da corrente na carga resistiva
$I_{opri}$	Valor médio da corrente na carga resistiva referida ao primário
$I_{LE}$	Valor médio da corrente no indutor do filtro de entrada
$I_{Dgmed}$	Valor médio da corrente no diodo do circuito de grampeamento
$I_{Lm}$	Valor máximo da corrente na indutância magnetizante
$I_{Limáx}$	Valor máximo da corrente no indutor do filtro de entrada
$I_{Limed}$	Valor médio da corrente no indutor do filtro de entrada
$I_{Lirms}$	Valor eficaz da corrente no indutor do filtro de entrada
$I_{Lomáx}$	Valor máximo da corrente no indutor do filtro de saída
$I_{Lomed}$	Valor médio da corrente no indutor do filtro de saída
$I_{Lorms}$	Valor eficaz da corrente no indutor do filtro de saída
$I_{primms}$	Valor eficaz da corrente no primário do transformador
$I_{secrms}$	Valor eficaz da corrente no secundário do transformador
$I_{terrms}$	Valor eficaz da corrente no terciário do transformador
$I_{Sef}$	Valor eficaz da corrente na chave S
$I_{S.máxoff}$	Valor máximo da corrente na chave no bloqueio
$I_{S.máxon}$	Valor máximo da corrente na chave na condução
$V_{S.máxoff}$	Valor máximo da tensão na chave no <i>Turn-Off</i>
$V_{S.máxon}$	Valor máximo da tensão na chave na <i>Turn-On</i>
$V_{portmin}$	Valor máximo da portadora
$V_{portmax}$	Valor mínimo da portadora
$V_o$	Valor médio da tensão de saída
$x_{max}$	Valor máximo da variável x
$x_{min}$	Valor mínimo da variável x
$x_{med}$	Valor médio da variável x
$\Delta I_{Ro}$	Variação da corrente na carga resistiva
$\Delta I_{Co}$	Variação da corrente no capacitor do filtro de saída
$\Delta I_{LE}$	Variação da corrente no indutor do filtro de entrada
$\Delta I_{Lo}$	Variação da corrente no indutor do filtro de saída
$\Delta V_O$	Variação da tensão de saída
$\Delta V_{CE}$	Variação da tensão sobre o capacitor do filtro de entrada
$\Delta x$	Variação da variável x
$\Delta T$	Variação de temperatura
$\Delta t$	Variação do tempo
$\Delta I_{LEmax}$	Variação máxima da corrente no indutor do filtro de entrada
$\Delta V_{CEmax}$	Variação máxima da tensão sobre o capacitor do filtro de entrada
V	Volt
W	Watts





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1	OBJETIVOS .....	27
1.1.1	Objetivo geral.....	27
1.1.2	Objetivos específicos .....	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO SOBRE CAPACITORES</b> .....	<b>29</b>
2.1	TIPOS DE CAPACITORES .....	30
2.1.1	Capacitores eletrolíticos.....	30
2.1.2	Capacitores de filme (plástico).....	31
2.1.3	Capacitores cerâmicos .....	31
2.1.3.1	Classificação de capacitores cerâmicos.....	31
2.1.3.1.1	Classe I (Temperature compensating type).....	31
2.1.3.1.2	Classe II (High dielectric type).....	32
2.1.3.1.3	Classe III.....	33
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA DE CAPACITORES COMERCIAIS</b> .....	<b>35</b>
3.1	CONVERSOR <i>BUCK</i> .....	35
3.1.1	Primeira Etapa de funcionamento.....	35
3.1.2	Segunda Etapa de funcionamento .....	36
3.2	CONVERSOR <i>FORWARD</i> .....	39
3.2.1	Primeira Etapa de funcionamento.....	39
3.2.2	Segunda Etapa de funcionamento .....	39
3.2.3	Terceira Etapa de funcionamento .....	40
3.3	MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA DE CAPACITORES .....	43
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO</b> .....	<b>44</b>
4.1	PROTÓTIPO 1 – CONVERSOR <i>FORWARD</i> .....	44
4.1.1	Projeto do filtro de entrada <i>LC</i> .....	44
4.1.2	Elaboração e montagem do protótipo do conversor <i>Forward</i> .....	45
4.1.3	Resultados experimentais .....	46
4.2	PROTÓTIPO 2 – CONVERSOR <i>BUCK</i> .....	46
4.2.1	Construção do protótipo do conversor <i>Buck</i> .....	46
4.2.2	Resultados experimentais e de simulação .....	47
4.2.2.1	Capacitor de Poliéster de 470 nF .....	48
4.2.2.2	Capacitor de Poliéster de 1 $\mu$ F.....	48
4.2.2.3	Capacitor cerâmico classe II de 4,7 $\mu$ F.....	49
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DO CAPACITOR VARIÁVEL CONTROLÁVEL</b> .....	<b>51</b>
5.1	CAPACITOR VARIÁVEL CONTROLÁVEL .....	51
5.1.1	Elaboração e montagem dos bancos de capacitores variáveis controláveis.....	51
5.2	MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA DO BANCO DE CAPACITORES .....	52
5.2.1	Medição com protótipo 2 (conversor <i>Buck</i> ).....	52
5.2.2	Medição com analisador de impedâncias.....	53
<b>6</b>	<b>RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM CAPACITOR SÉRIE COM A FONTE DE ENTRADA</b> .....	<b>55</b>
6.1	ANÁLISE DA OPERAÇÃO DO CIRCUITO .....	55
6.1.1	Intervalo 1: $\theta \leq t \leq t_1$ .....	55

<b>6.1.2 Intervalo 2: <math>t_1 \leq t \leq t_2</math></b> .....	<b>56</b>
<b>6.1.3 Intervalo 3: <math>t_2 \leq t \leq t_3</math> e Intervalo 4: <math>t_3 \leq t \leq t_4</math></b> .....	<b>56</b>
6.2 Características estáticas de carga.....	57
6.3 Projeto do retificador com capacitância série variável controlável.....	57
<b>6.3.1 Construção do retificador</b> .....	<b>58</b>
6.4 Resultados teóricos e de simulação.....	58
<b>6.4.1 Placa 1</b> .....	<b>59</b>
6.4.1.1 Resultados teóricos .....	59
6.4.1.2 Resultados de simulação.....	63
6.4.1.3 Erro relativo .....	63
<b>6.4.2 Placa 2</b> .....	<b>64</b>
6.4.2.1 Resultados teóricos .....	64
6.4.2.2 Resultados de simulação.....	68
6.4.2.3 Erro relativo .....	68
6.5 Resultados experimentais .....	69
<b>6.5.1 Placa 1</b> .....	<b>69</b>
6.5.1.1 Comparação dos resultados das tensões teóricas e experimentais .....	71
<b>6.5.2 Placa 2</b> .....	<b>73</b>
6.5.2.1 Comparação dos resultados das tensões teóricas e experimentais .....	76
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>79</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>81</b>
<b>APÊNDICE A – Dados técnicos dos capacitores utilizados</b> .....	<b>83</b>
<b>APÊNDICE B – Projeto do Protótipo 1 (<i>Forward</i>)</b> .....	<b>86</b>
<b>APÊNDICE C – Projeto do Protótipo 2 (<i>Buck</i>)</b> .....	<b>95</b>
<b>APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck</b> .....	<b>103</b>
<b>APÊNDICE E – Memória de cálculo do retificador</b> .....	<b>119</b>
<b>APÊNDICE F – Diagrama Esquemático do Conversor Buck</b> .....	<b>127</b>
<b>APÊNDICE G – Diagrama Esquemático da placa para 10 capacitores associados em paralelo (tamanho 2220)</b> .....	<b>128</b>
<b>APÊNDICE H – Diagrama Esquemático do capacitor variável Placa 1</b> .....	<b>129</b>
<b>APÊNDICE I – Diagrama Esquemático do capacitor variável Placa 2</b> .....	<b>130</b>
<b>APÊNDICE J – Diagrama Esquemático do Conversor Forward</b> .....	<b>131</b>
<b>ANEXO A – Diagrama Esquemático da placa de controle da chave do Conversor Forward</b> .....	<b>133</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de equipamentos elétricos e eletrônicos impulsionou os estudos em relação ao uso de capacitores. Este trabalho irá estudar com mais detalhamento o uso de capacitores cerâmicos classe II.

Os capacitores cerâmicos são amplamente utilizados na área de eletrônica de potência pelas suas múltiplas características vantajosas. Possuem dimensões pequenas, altas constantes dielétricas, baixa resistência e indutância série equivalente e são compatíveis a altas frequências.

Será visto que os capacitores cerâmicos classe II possuem uma característica que é a dependência da capacitância com a tensão. Tal característica pode ser vista como uma desvantagem no uso desses capacitores. No entanto, este trabalho irá utilizar tal característica como uma vantagem empregando-os em um circuito que se comporta como um capacitor variável cuja capacitância é controlável. Tal circuito será utilizado para a realização de uma fonte de tensão contínua com tensão de saída variável.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo geral

Estudar a aplicação de um circuito de capacitores cerâmicos classe II visando obter um capacitor variável controlável para aplicação em uma fonte de tensão contínua com tensão de saída variável.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar as diferenças entre os capacitores eletrolíticos, de filme e cerâmicos;
- Estudar o comportamento do capacitor cerâmico classe II;
- Estudar e implementar um método de medição de capacitância de capacitores comerciais, a fim de validar a curva capacitância versus tensão dos capacitores cerâmicos classe II;
- Estudar e montar um circuito com capacitância variável controlável a partir de capacitores cerâmicos classe II;
- Estudar e implementar um capacitor variável controlável em um retificador de onda completa a fim de realizar uma fonte com tensão contínua com tensão de saída variável.



## 2 REVISÃO SOBRE CAPACITORES

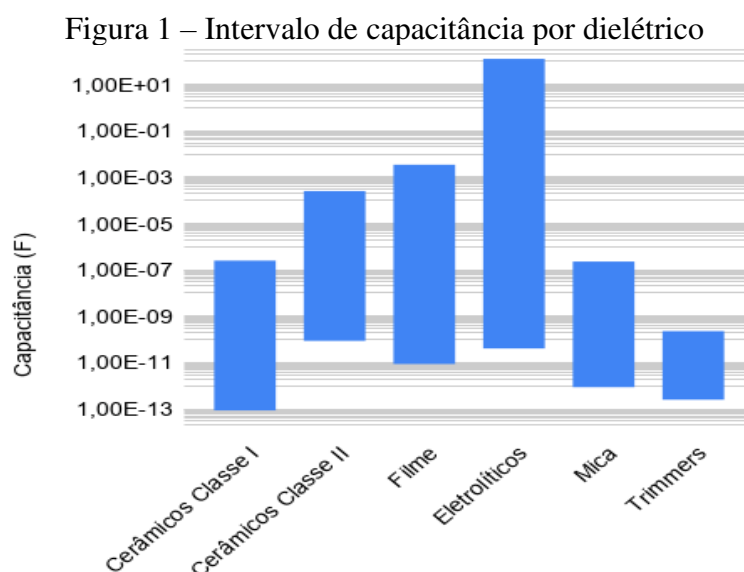
Segundo a Kemet® (2013), os capacitores são componentes eletrônicos passivos utilizados para armazenar, filtrar e regular a energia elétrica e o fluxo de corrente. Possuem dois terminais interiormente conectados por placas metálicas e separadas por um material dielétrico. O material dielétrico é todo material que se comporta como isolante até ser submetido a uma certa quantidade de carga, após isso, torna-se um condutor (CALLISTER; WILLIAM, 2008). Existem diversos materiais que podem exercer o papel de dielétrico em um capacitor. A Tabela 1 mostra a constante dielétrica ( $\kappa$ ) dos materiais comumente utilizados.

Tabela 1 – Constante Dielétrica dos materiais comumente utilizados

Material Dielétrico	Constante Dielétrica ( $\kappa$ )
Vácuo	1
Ar	1,0006
Polipropileno PP	2,2
Sulfeto de p-fenileno PPS	3,0
Poliéster PET	3,3
Poliéster PEN	3,0
Papel impregnado	2,0 – 6,0
Mica	6,8
Óxido de Alumínio	8,5
Óxido de Tântalo	27,7
Cerâmicas Classe I	5,0 – 90,0
Cerâmicas Classe II	1000 - 2000

Fonte: KEMET (2013); PAN e RANDALL (2010); MUSSOI e VILLAÇA (2000)

Cada um desses materiais apresenta limitações construtivas e elétricas, fazendo com que cada material tenha um intervalo de capacitância possível. A Figura 1 mostra esses intervalos de capacitância por dielétrico. A unidade da capacitância é o *Farad*. Para 1 *Farad* de capacitância, 1 *Coulomb* de energia é armazenado quando 1 *Volt* é aplicado sobre os terminais do capacitor (KEMET, 2013).



Fonte: Autoria própria

## 2.1 TIPOS DE CAPACITORES

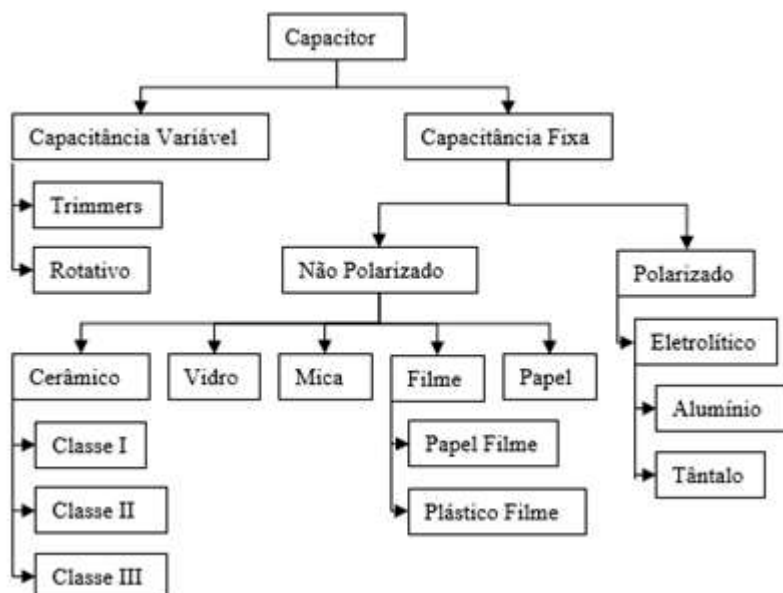
Os capacitores podem ser classificados pela capacitância, sendo fixa ou variável. Os capacitores variáveis têm sua capacitância ajustada por um eixo, ou seja, fisicamente ajustada. Já os capacitores de capacitância fixa não apresentam nenhum mecanismo físico para a mudança de sua capacitância. Os mais utilizados são os com capacitância fixa. Esses podem ser ainda divididos em polarizados e não polarizados (KEMET, 2013).

Este trabalho descreveu com mais detalhes os capacitores eletrolíticos, os de filme e os cerâmicos, dando mais ênfase ao último e focando na sua aplicação na área de eletrônica de potência. A Figura 2 mostra uma visão geral da classificação dos capacitores.

A escolha de um capacitor envolve quatro características (SARJEANT; ZIRNHELD; MACDOUGALL, 1998):

- I. Geometria dos componentes (dimensões mecânicas, dimensões dos terminais e localização dos terminais);
- II. Local de instalação (temperatura, umidade, tensão, frequência, altitude, vibrações etc.);
- III. Características elétricas (capacitância, tolerância e tensão nominal);
- IV. Características construtivas (variação de capacitância, fator de dissipação, resistência da isolamento, coeficiente de temperatura da capacitância).

Figura 2 – Visão geral dos capacitores



Fonte: Adaptado de KEMET (2013)

### 2.1.1 Capacitores eletrolíticos

Os capacitores eletrolíticos podem utilizar dois tipos de dielétricos: o alumínio e o tântalo. Ambos os capacitores apresentam polaridade, são compactos e com alta capacitância (KEMET, 2013; PANASONIC, 2016). Eles podem ser usados em projetos tanto de baixa quanto de média tensão, já que existem modelos de 3 V até 10 kV. No entanto, os modelos para médias tensões (>1 kV) apresentam uma capacitância máxima na faixa de 3  $\mu$ F.

De acordo com Panasonic® (2016), os capacitores de alumínio apresentam eletrólitos líquidos que com o tempo poderá secar, gerando um mau funcionamento do circuito. Além disso apresentam uma alta dependência da temperatura e da frequência e um alto fator de dissipação. Este capacitor tende a aquecer mais internamente quando uma corrente alternada circula por ele. Normalmente o critério térmico é predominante na seleção desses capacitores quando destinados a serem empregados em conversores estáticos. É por isso que na prática, normalmente, utiliza-se um capacitor com a capacitância muito maior que a calculada.

Já os capacitores de tântalo apresentam eletrólitos sólidos. baixa dependência da temperatura e da frequência. Além disso são mais caros que os de alumínio.

### 2.1.2 Capacitores de filme (plástico)

Os capacitores de filme têm como dielétrico um filme plástico. Os materiais comumente utilizados são: poliéster (mylar), poliestireno e polipropileno policarbonato. As principais características desses capacitores são: baixa tolerância, alta durabilidade (alta resistência mecânica para altas temperaturas e elevada umidade), auto regeneração (para os metalizados), não polarizados e são adequados para trabalhar com altas frequências (PANASONIC, 2016; MUSSOI; VILLAÇA,2000). Eles podem ser usados em projetos tanto de baixa quanto de média tensão, já que existem modelos de 3 V até 10 kV. Os modelos para médias tensões (>1 kV) apresentam uma capacitância máxima na faixa de 3 mF.

Um ponto negativo desses capacitores é a dimensão, pois têm volumes maiores do que os capacitores cerâmicos ou eletrolíticos, para uma mesma capacitância.

### 2.1.3 Capacitores cerâmicos

Os capacitores cerâmicos consistem, normalmente, em um disco de cerâmica (dielétrico) com duas fitas metálicas em cada uma das suas faces. De forma geral, as principais características desses capacitores são: não são polarizados, baixa indutância e resistência série, tamanho reduzido, baixo custo e alta constante dielétrica (PAN; RANDAL,2010).

#### 2.1.3.1 Classificação de capacitores cerâmicos

Os capacitores cerâmicos podem usar vários tipos de dielétricos, os quais são divididos em classes: Classe I, Classe II e Classe III (PAN; RANDAL,2010).

##### 2.1.3.1.1 Classe I (*Temperature compensating type*)

Os capacitores da classe I possuem baixo valor de constante dielétrica  $\kappa$  (desde cinco até algumas centenas) e baixo fator de dissipação (menor que 0.01). Normalmente apresentam o coeficiente de temperatura da permissividade linear, de zero até alguns milhares de ppm/°C, oferecem um alto nível de estabilidade e baixa perda. Eles não são tão sensíveis a mudanças de temperaturas, e o valor da capacitância se mantêm quase que constante para qualquer valor dentro da tensão nominal. São ideais para circuitos ressonantes, osciladores e filtros.

Eles podem ser usados em projetos tanto de baixa quanto de média tensão, já que existem modelos de 6,3 V até 3,150 kV. Os modelos para médias tensões (>1 kV) apresentam uma capacitância máxima na faixa de 10000 pF.

Estes capacitores são nomeados com três caracteres. O primeiro é sempre uma letra e indica a mudança da capacitância por temperatura ppm/°C. O segundo é um número que indica o multiplicador. E o terceiro é uma letra que indica o erro máximo em ppm/°C.

A Tabela 2 mostra a especificação para a classificação desses capacitores.

Tabela 2 – Nomenclatura capacitores Classe I

1° Caractere		2°Caractere		3°Caractere	
Letra	Dígito ( $ppm/^{\circ}C$ )	Número	Multiplicador	Letra	Tolerância ( $ppm/^{\circ}C$ )
C	0,0	0	-1	G	+/- 30
B	0,3	1	-10	H	+/- 60
L	0,8	2	-100	J	+/- 120
A	0,9	3	-1000	K	+/- 250
M	1,0	5	+1	L	+/- 500
P	1,5	6	+10	M	+/- 1000
R	2,2	7	+100	N	+/- 2500
S	3,3	8	+1000		
T	4,7				
V	5,6				
U	7,5				

Fonte: PAN e RANDAL (2010)

### 2.1.3.1.2 Classe II (High dielectric type)

Os capacitores da classe II possuem alto valor de constante dielétrica  $\kappa$  (1000 até 20000) e baixo fator de dissipação (0.01 até 0.03). Uma característica importante desta classe de dielétricos é que a constante dielétrica é uma função não linear da temperatura. Estes capacitores apresentam maior permissividade que os de classe I, isso resulta em uma maior capacitância por volume. Ainda, exibem coeficiente não linear de variação da capacitância em função da tensão.

Eles podem ser usados em projetos tanto de baixa quanto de média tensão, já que existem modelos de 2,5 V até 1,25 kV. Os modelos para médias tensões (>1 kV) apresentam uma capacitância máxima na faixa de 0,22  $\mu$ F.

Estes capacitores são nomeados com três caracteres. O primeiro é sempre uma letra que indica a menor temperatura de operação. O segundo é um número que indica a maior temperatura de operação. E o terceiro é uma letra que indica a mudança de capacitância no intervalo de temperatura em porcentagens.

A Tabela 3 mostra a especificação para a classificação desses capacitores.

Tabela 3 – Nomenclatura capacitores Classe II

1°Caractere		2°Caractere		3°Caractere	
Letra	Temperatura Mínima	Número	Temperatura Máxima	Letra	Tolerância (%)
X	-55 $^{\circ}C$	2	+48 $^{\circ}C$	A	+/- 1,0
Y	-30 $^{\circ}C$	4	+65 $^{\circ}C$	B	+/- 1,5
Z	+10 $^{\circ}C$	5	+85 $^{\circ}C$	C	+/- 2,2
		6	+105 $^{\circ}C$	D	+/- 3,3
		7	+125 $^{\circ}C$	E	+/- 4,7
		8	+150 $^{\circ}C$	F	+/- 7,5
				P	+/- 10,0
				R	+/- 15,0
				S	+/- 22,0
				T	+22/-33
				U	+22/-56
				V	+22/-82

Fonte: PAN e RANDAL (2010)

Este documento irá descrever o trabalho realizado usando dois capacitores cerâmicos classe II. O primeiro é o CGA9N2X7R2A475K230KA da TDK Corporation®. Sua capacitância varia de 4,7  $\mu$ F a 1,234  $\mu$ F em um intervalo de tensão de 0 V a 100 V.

O segundo é o *C1206C106K4RAC7800* da *Kemet*<sup>®</sup>. Sua capacitância varia 10  $\mu\text{F}$  a 2,525  $\mu\text{F}$  em um intervalo de tensão de 0 V a 16 V.

Mais informações sobre esses capacitores são apresentadas em “APÊNDICE A – Dados técnicos dos capacitores utilizados”.

#### *2.1.3.1.3 Classe III*

Os capacitores da classe III possuem um alto nível de permissividade. Porém, são inferiores em termos de precisão, estabilidade e envelhecimento ao longo do tempo. A capacitância é muito dependente da tensão, tendo uma característica de temperatura não linear e altas perdas.





### 3 ESTUDO DE UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA DE CAPACITORES COMERCIAIS

No item 2.1.3.1.2 foi visto que os capacitores cerâmicos classe II possuem uma característica que é a dependência da capacitância com a tensão. Esta seção apresenta o estudo e a metodologia de análise desenvolvida capaz de verificar tal característica.

Para medir a capacitância de capacitores cerâmicos classe II e III, a Kemet (2014) propõe utilizar instrumentos chamados: medidores LCR. Esses instrumentos medem a impedância de um capacitor usando uma tensão alternada e frequência conhecidas. O valor da capacitância é então extraído da medição da impedância. Um exemplo de um instrumento desses é *Agilent E4980 LCR meter*. Como no laboratório não existia um exemplar deste instrumento buscou-se uma outra maneira de determinar a capacitância de capacitores comerciais.

A solução foi utilizar conversores *Buck* e *Forward*. A metodologia estudada aproveitou de uma característica da operação desses conversores. Ambos os conversores apresentam uma etapa onde a corrente no capacitor de entrada é constante e a tensão sobre o capacitor varia de forma linear. O porquê da importância desta característica foi discutido no item 3.3.

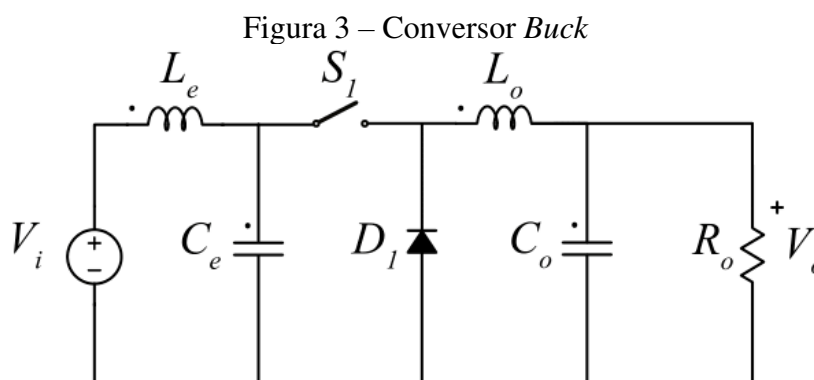
Assim, primeiramente será explicado o funcionamento dos conversores *Buck* e *Forward*, e depois o método para a determinação da capacitância utilizado. As análises em ambos os conversores foram feitas em modo de condução contínua.

#### 3.1 CONVERSOR BUCK

Conforme Martins e Barbi (2008), o conversor *Buck* é um conversor CC-CC que “diminui” a tensão, ou seja, a tensão de saída do conversor é menor do que sua tensão de entrada. Isso acontece, porque, por meio de chaves semicondutoras, é possível controlar o valor médio da tensão de saída do conversor, através da relação entre o tempo que a chave permanece fechada e o tempo que ela permanece aberta.

O processo de controle da chave utilizado, que determina os instantes de abertura e fechamento, é chamado de Modulação por Largura de Pulso (PWM). Por este método, determina-se um ciclo de trabalho ( $D$ ) através da comparação entre um sinal de controle e uma onda portadora dente de serra. Para minimizar as componentes harmônicas do sinal chaveado, é utilizado um filtro *LC* na entrada e na saída do conversor. Além disso, adiciona-se um diodo de roda livre ( $D_I$ ) para fornecer um caminho para a corrente no indutor, evitando o surgimento de sobretensão na chave no momento da abertura.

O conversor *Buck* estudado apresentava uma carga resistiva como mostrado na Figura 3.



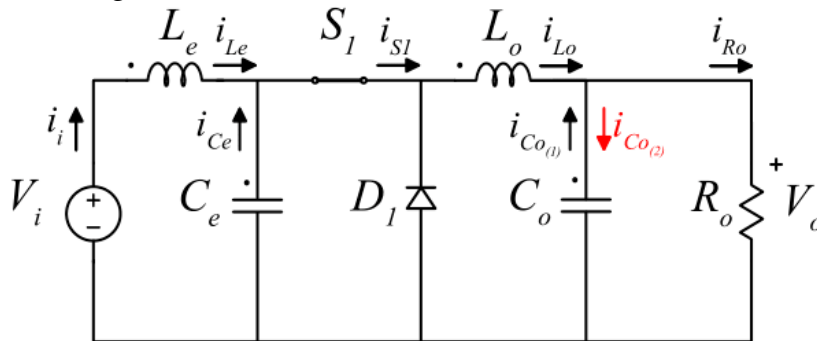
Fonte: Adaptado de MARTINS e BARBI (2008)

##### 3.1.1 Primeira Etapa de funcionamento

O estado topológico durante a primeira etapa de operação, de duração  $0 < t < D \cdot T$ , é apresentada na Figura 4.  $T$  é o período de comutação, e  $D$  representa a razão cíclica. O produto dessa multiplicação é também conhecido como tempo de condução da chave ( $t_c$ ). Como se pode ver na Figura 4, durante a primeira etapa, a chave  $S_I$  está fechada (conduzindo). Assim, a energia é transferida da fonte de

tensão  $V_i$  para a carga  $R_o$ . Nesta etapa, os dois indutores ( $L_e$  e  $L_o$ ) estão armazenando energia, e o diodo  $D_1$  não está conduzindo (MARTINS; BARBI, 2008).

Figura 4 – Conversor *Buck* com a chave  $S_1$  fechada

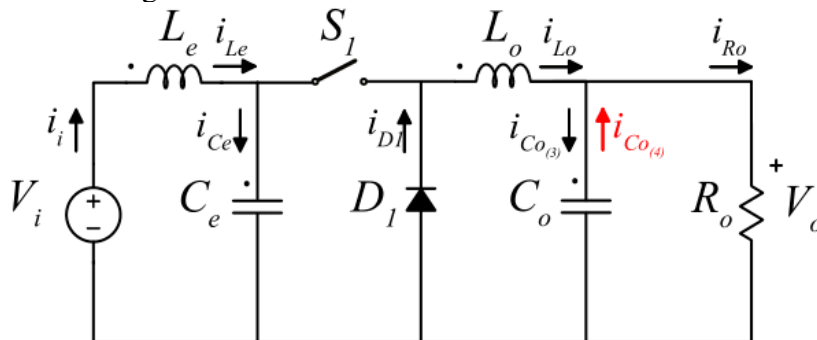


Fonte: Adaptado de MARTINS e BARBI (2008)

### 3.1.2 Segunda Etapa de funcionamento

O estado topológico durante a segunda etapa de operação, de duração  $DT < t < T$ , é apresentada na Figura 5. Esse intervalo é também conhecido como tempo em que a chave  $S_1$  permanece aberta ( $ta$ ). Nesta etapa a chave  $S_1$  está aberta (não conduzindo) e o diodo  $D_1$  passará a conduzir. Percebe-se que parte da energia previamente acumulada no indutor  $L_o$  será transferida para o resistor  $R_o$  e a energia acumulada no indutor  $L_e$  devolvida para fonte  $V_i$  (MARTINS; BARBI, 2008).

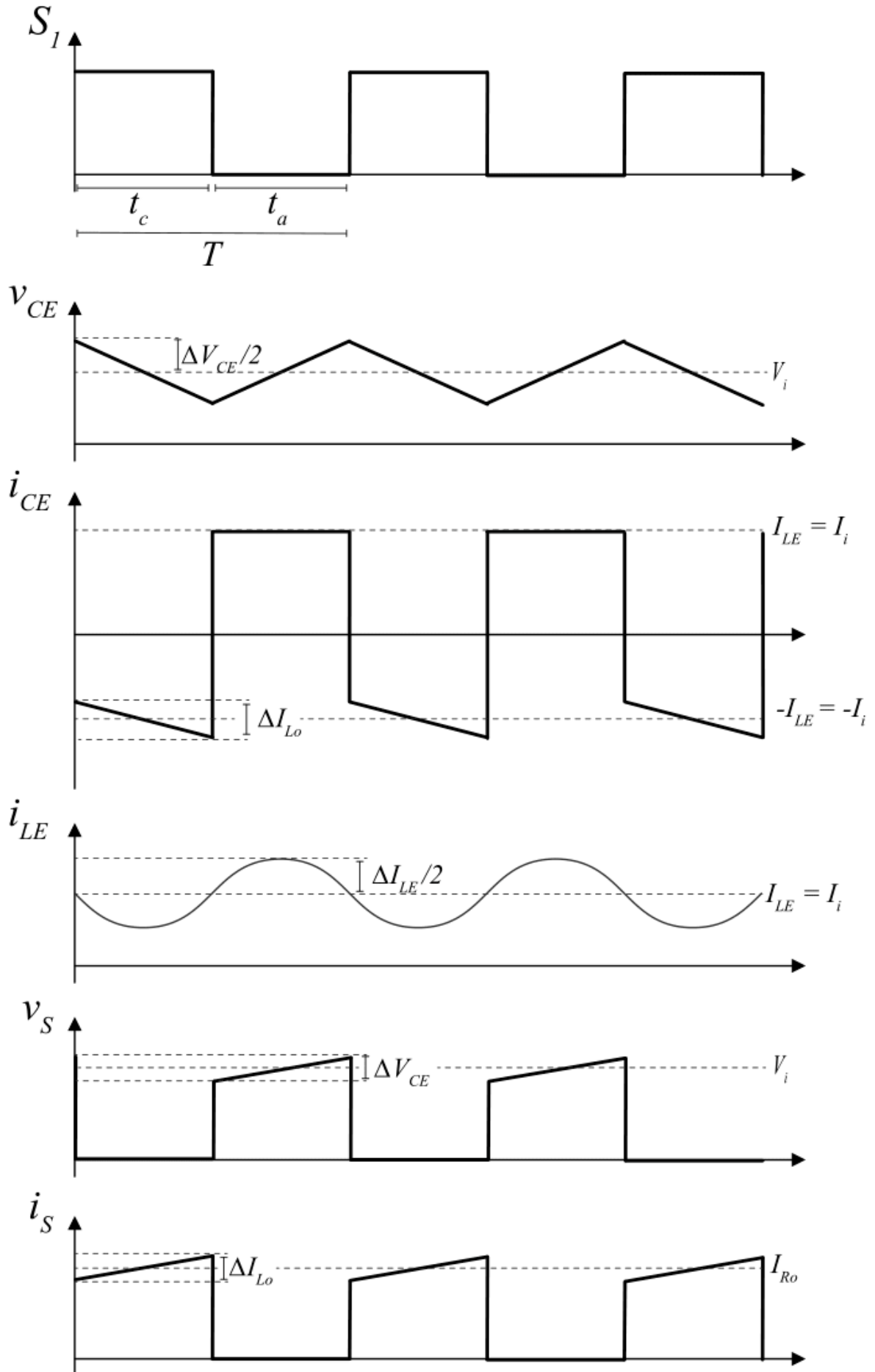
Figura 5 – Conversor *Buck* com a chave aberta



Fonte: Adaptado de MARTINS e BARBI (2008)

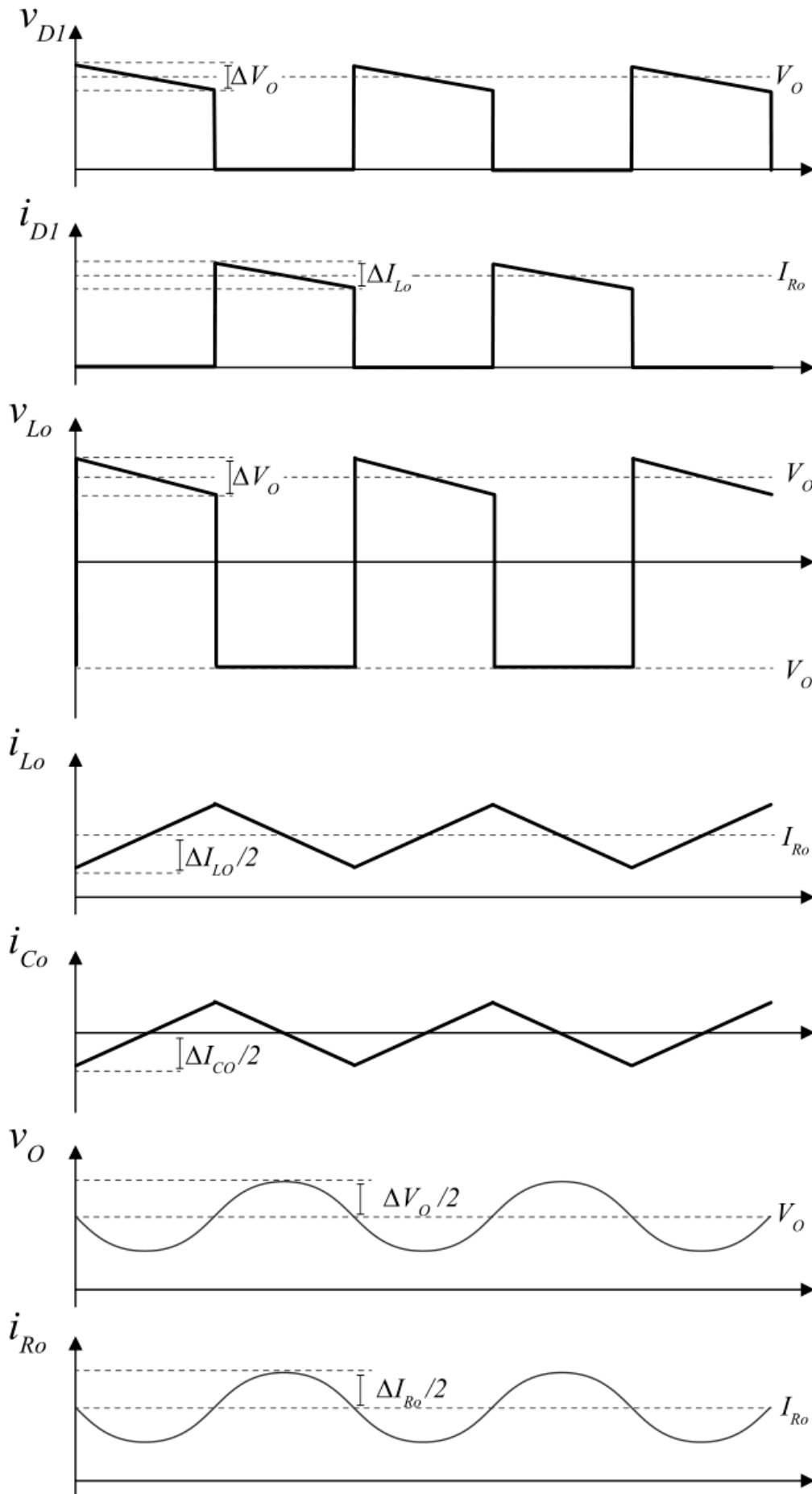
As Figura 6 e Figura 7 mostram as principais formas de onda do conversor *Buck*.

Figura 6 – Principais formas de onda do conversor *Buck*



Fonte: Adaptado de MARTINS e BARBI (2008)

Figura 7 – Principais formas de onda do conversor *Buck* (continuação)

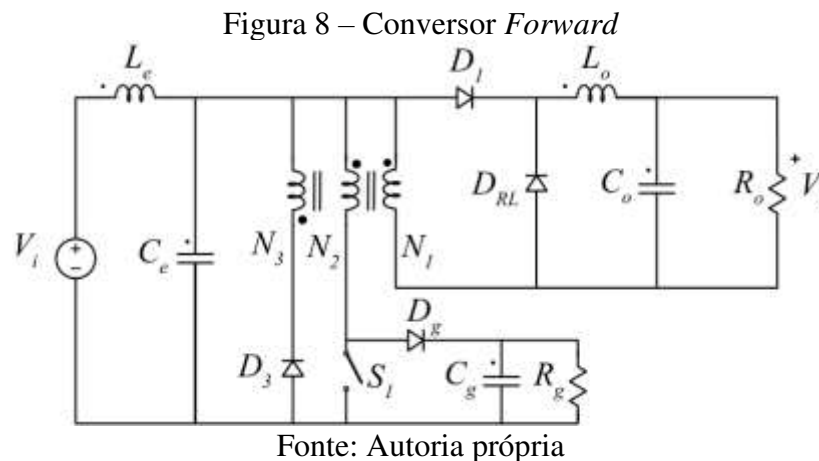


Fonte: Adaptado de MARTINS e BARBI (2008)

### 3.2 CONVERSOR *FORWARD*

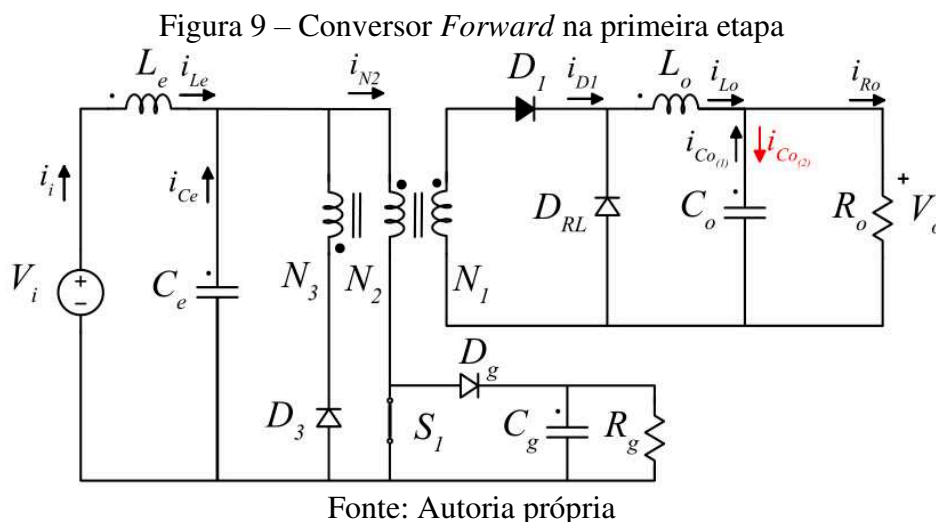
O conversor *Forward* pode ser chamado como um conversor “*buck* isolado”, ou seja, é um conversor CC-CC que a tensão de saída do conversor é menor do que a sua tensão de entrada com a presença do transformador, que isola a entrada da saída do conversor. Seu funcionamento é muito parecido com o conversor *Buck* anteriormente explicado. A diferença é a ocorrência de mais uma etapa de operação, quando o diodo  $D_3$  conduz para desmagnetizar o transformador (MARTINS, 2018).

O conversor *Forward* estudado apresentava uma carga resistiva como mostrado na Figura 8.



#### 3.2.1 Primeira Etapa de funcionamento

O estado topológico durante a primeira etapa, de duração  $0 < t < D \cdot T$ , é apresentada na Figura 9.  $T$  é o período de comutação, e  $D$  representa a razão cíclica. O produto dessa multiplicação é também conhecido como tempo de condução da chave ( $t_c$ ). Como se pode ver na Figura 9, durante a primeira etapa, a chave  $S_1$  está fechada (conduz). Assim, a energia é transferida da fonte de tensão  $V_i$  para a carga  $R_o$ . Nessa etapa, os dois indutores ( $L_e$  e  $L_o$ ) armazenam energia, o diodo  $D_1$  conduz e os diodos  $D_{RL}$  e  $D_3$  não conduzem (MARTINS, 2018).



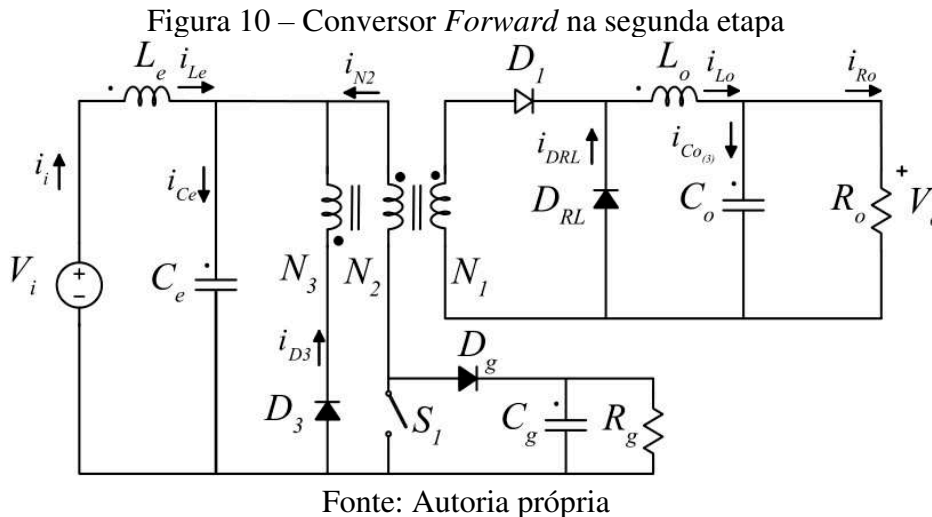
#### 3.2.2 Segunda Etapa de funcionamento

O estado topológico durante a segunda etapa, de duração  $D \cdot T < t < t_m$ , é apresentada na Figura 10. Nesta etapa a chave  $S_1$  está aberta (não conduz), o diodo  $D_1$  para de conduzir e dos diodos  $D_{RL}$  e  $D_3$  passam a conduzir. Percebe-se que parte da energia previamente acumulada no indutor  $L_o$  será

transferida para o resistor  $R_o$  e a energia acumulada no indutor  $L_e$  devolvida para fonte  $V_i$  (MARTINS, 2018).

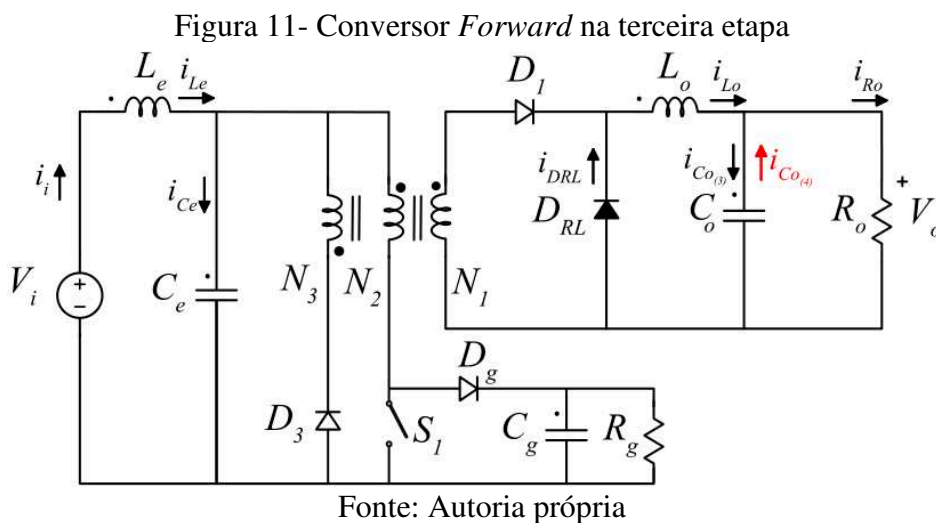
Durante esta etapa acontece também a desmagnetização do transformador. Para isso, o diodo  $D_3$  conduz permitindo a passagem de uma corrente no enrolamento terciário do transformador. Essa corrente induz uma tensão no sentido contrário no enrolamento primário, desmagnetizando o transformador.

É possível ver na Figura 10 um circuito em paralelo com a chave, que é denominado circuito de grameamento. Ele serve para proteger a chave de altas tensões, desviando a energia para ser dissipada no resistor  $R_g$ . Para isso, dimensiona-se esse circuito de modo que o diodo  $D_g$  conduza quando a tensão na chave for maior que uma tensão  $V_g$ . Tal tensão deve ser menor que o valor nominal de tensão da chave utilizada.



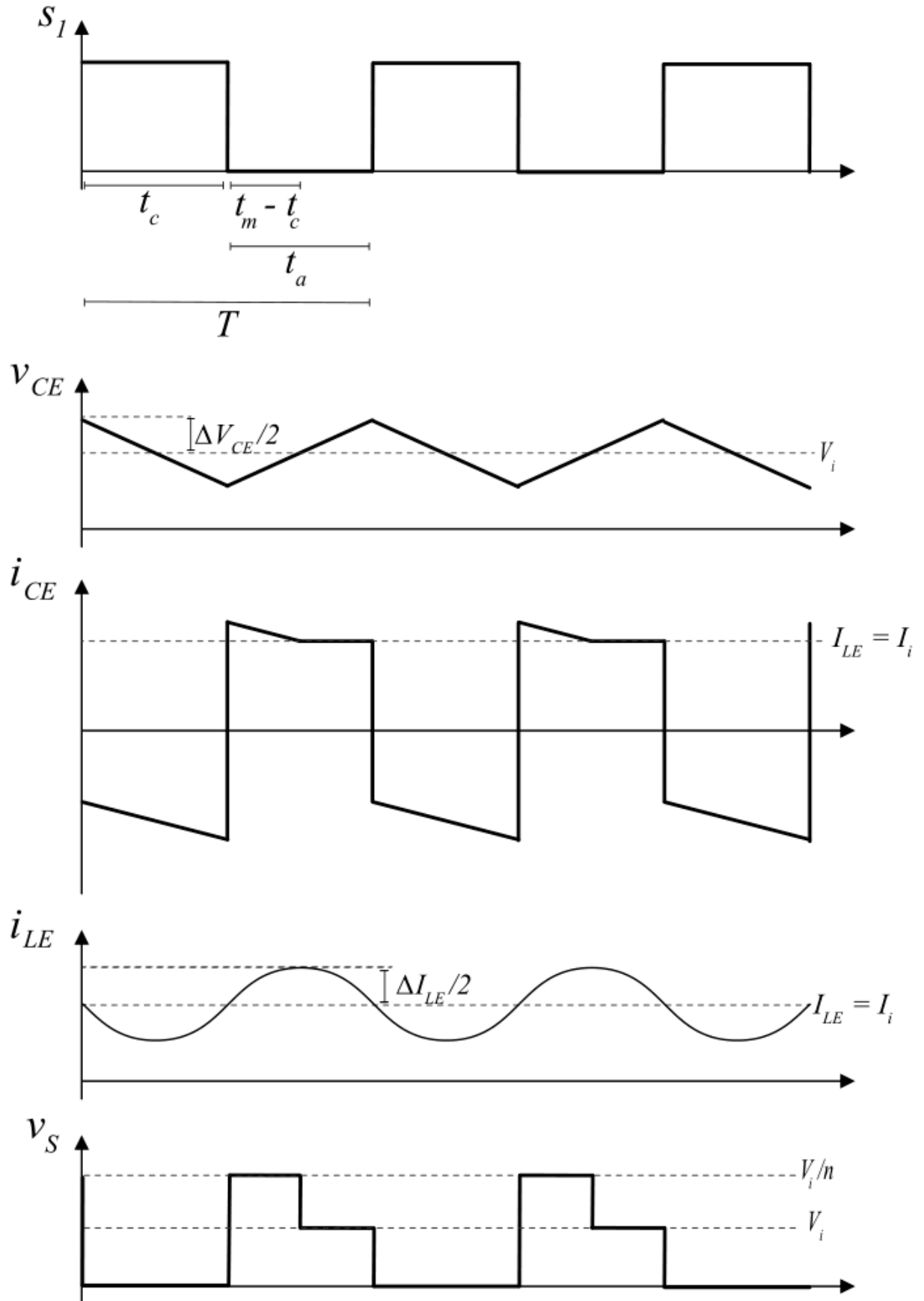
### 3.2.3 Terceira Etapa de funcionamento

O estado topológico durante a terceira etapa, de duração  $t_m < t < T$ , é apresentada na Figura 11. Nesta etapa a chave  $S_1$  continua aberta (não conduz), os diodos  $D_1$  e  $D_3$  não conduzem e o diodo  $D_{RL}$  conduz. Percebe-se que a energia previamente acumulada no indutor  $L_o$  continua sendo transferida para o resistor  $R_o$  e a energia acumulada no indutor  $L_e$  devolvida para fonte  $V_i$  (MARTINS, 2018).



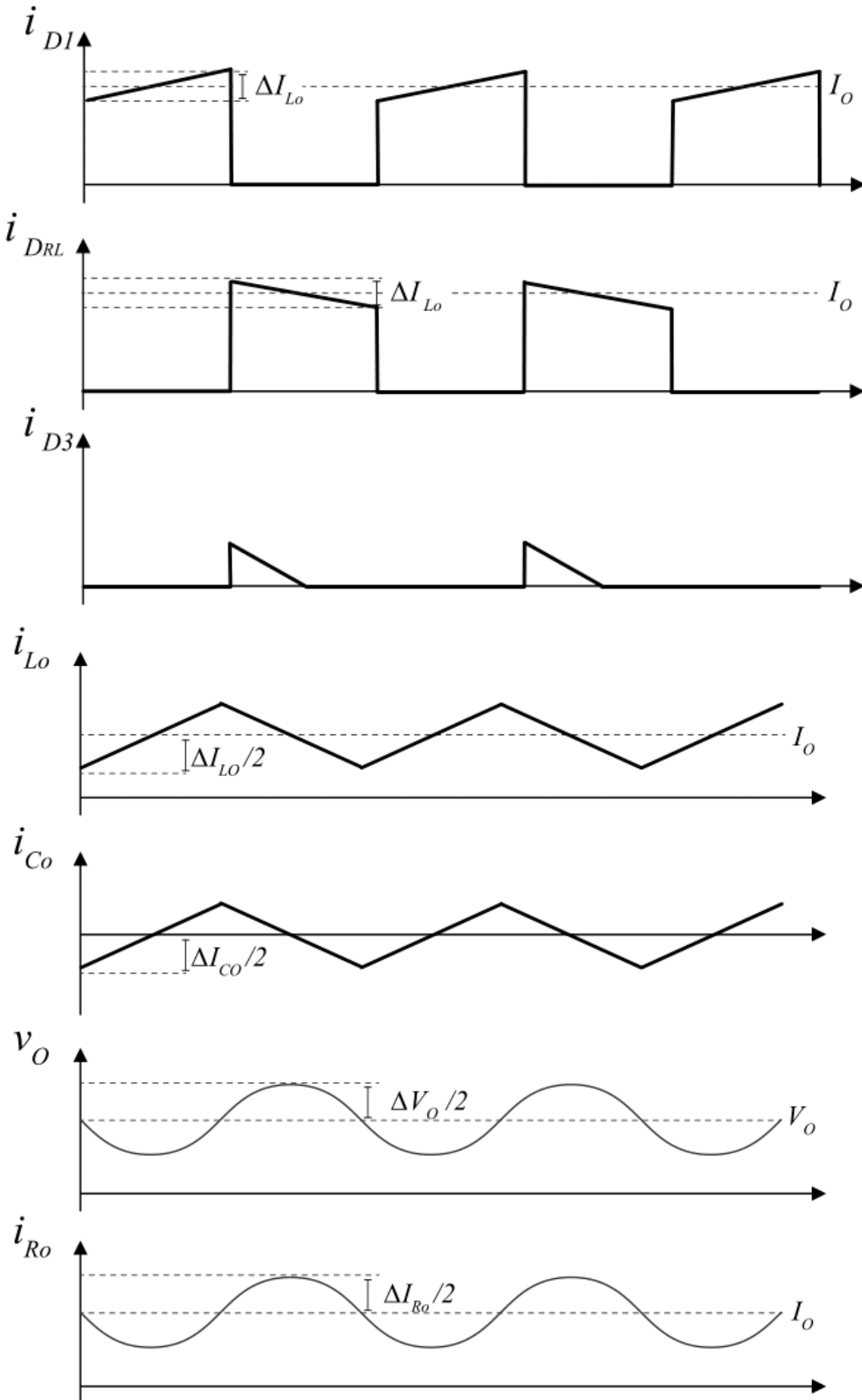
As Figura 12 e Figura 13 mostram as principais formas de onda do conversor *Forward*.

Figura 12 – Principais formas de onda do conversor *Forward*



Fonte: Adaptado de MARTINS (2018)

Figura 13 – Principais formas de onda do conversor *Forward* (continuação)



Fonte: Adaptado de MARTINS (2018)



### 3.3 MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA DE CAPACITORES

O método para a determinação da capacitância de capacitores parte da definição apresentada em (1), que a corrente em qualquer capacitor é diretamente proporcional à derivada em relação ao tempo, da tensão aplicada sobre ele.

$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

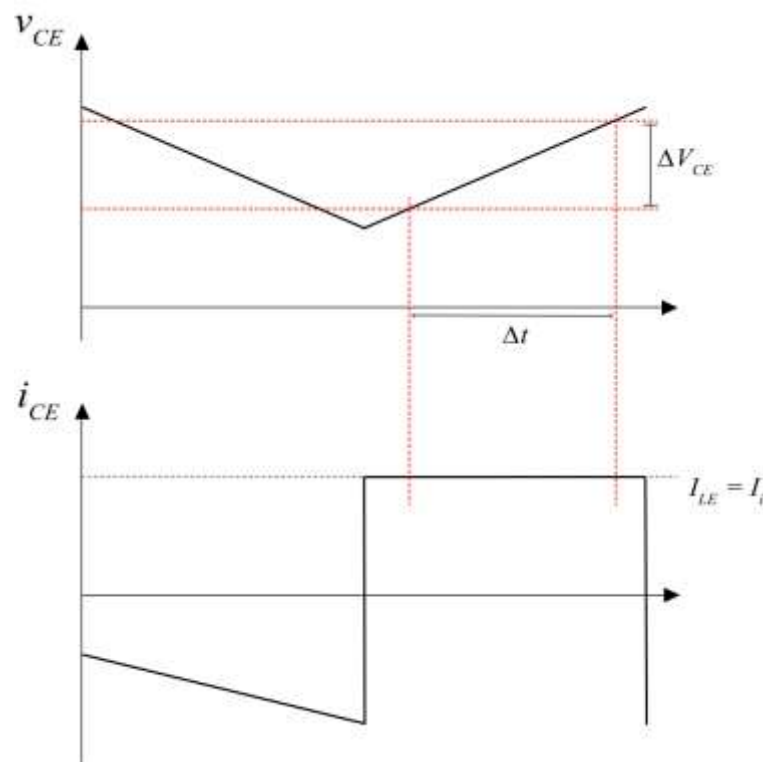
Em ambos os conversores explicados anteriormente, *Buck* e *Forward*, coloca-se os capacitores cuja capacitâncias pretende-se descobrir no lugar de  $C_e$  (capacitor do filtro de entrada). Utilizando um osciloscópio, mede-se a tensão e a corrente nesse capacitor.

No conversor *Buck*, quando a chave  $S_1$  estiver aberta, a tensão no capacitor  $C_e$  estará crescente e a corrente terá seu valor médio igual a  $I_i$  com uma ondulação de  $\Delta I_{LE}$ . Essa ondulação é definida pelo projeto do indutor  $L_e$ . Assim, dependendo do projeto do indutor essa ondulação será tão pequena que a corrente nessa etapa poderá ser considerada constante. Considerando então constante a corrente  $I_i$  nessa etapa, o valor da capacitância poderá ser calculado através da medição de dois pontos com o cursor do osciloscópio, como mostrado na Figura 14. Em (2) tem-se a definição de capacitância que relaciona carga com diferença de potencial.

$$C_e = I_{ce} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V_{CE}} \quad (2)$$

A medição no conversor *Forward* ocorre da mesma maneira que no conversor *Buck* a única diferença é que se faz a medição na terceira etapa de funcionamento do conversor, e não na segunda como é feito no conversor *Buck*. Como explicado na seção 3.2, na segunda etapa de operação do conversor *Forward* ocorre a desmagnetização do transformador. Isso acarreta uma variação linear na tensão e na corrente do capacitor do filtro de entrada. Somente, na terceira etapa de operação, após o término da desmagnetização do transformador, a corrente no capacitor atinge um valor constante.

Figura 14 – Medição da capacitância no conversor *Buck*



Fonte: Autoria própria

## 4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

Esta seção apresenta o estudo e a validação da medição da capacitância de capacitores. Foram construídos dois protótipos para esta medição, um conversor *Forward* e um conversor *Buck*.

Para validar o método de medição proposto na seção 3.3, primeiramente, foram medidas as capacitâncias de dois capacitores de poliéster, que apresentam capacitância fixa. Após a comprovação do método foi feita a verificação dos dados apresentados pelo fabricante de um dos capacitores cerâmicos classe II, a fim de observar a dependência da capacitância com a tensão desses capacitores.

Este procedimento foi feito primeiramente por simulação visando validar o método e treinar o procedimento de obter os dados com os cursores. Ou seja, nas ondas obtidas pelo simulador, o cursor do simulador foi posicionado em dois momentos diferentes na etapa onde a chave do conversor estava aberta a fim de obter a diferença de tensão, intervalo de tempo e o valor médio da corrente nesses momentos. Apesar da capacitância da simulação não apresentar tolerância, ou seja, ela é constante, os resultados obtidos apresentaram divergências por serem resultados calculados a partir das formas de onda. Contendo, então, erros de medições.

Após a validação do método via simulação, que foi feita a análise experimental.

A seguir serão apresentadas as análises realizadas com três tipos capacitores (dois de poliéster e um cerâmico), comparando o estudo de simulação computacional com a experimentação prática e o valor apresentado pelo fabricante.

A simulação e o cálculo numérico foram feitos utilizando os softwares *PSIM*<sup>®</sup> e *Mathcad*<sup>®</sup>.

### 4.1 PROTÓTIPO 1 – CONVERSOR FORWARD

O primeiro conversor utilizado foi um conversor *Forward* (Figura 8). A medição ocorre no capacitor do filtro de entrada  $C_e$ .

O protótipo utilizado foi reaproveitado de um outro projeto (APÊNDICE B – Projeto do Protótipo 1 (*Forward*)). Como ele não tinha originalmente um filtro de entrada foi projetado um para o experimento. Suas especificações são:

- Potência ( $P$ ): 100 W;
- Tensão de entrada ( $V_i$ ): 100 V;
- Variação máxima da corrente no indutor de saída ( $\Delta I_{LO}$ ): 20 %;
- Variação máxima da tensão na saída ( $\Delta V_{LO}$ ): 5 %;
- Frequência de chaveamento ( $f_s$ ): 47,5 kHz;
- Resistência de carga ( $R_O$ ): 24,2  $\Omega$ .

#### 4.1.1 Projeto do filtro de entrada LC

O filtro de entrada foi projetado visando medir a capacitância de 10 capacitores cerâmicos (*CGA9N2X7R2A475K230KA / TDK*<sup>®</sup>) 4,7  $\mu$ F associados em paralelo, a fim de observar o comportamento da dependência da capacitância com a tensão.

A dedução das equações para o projeto do filtro de entrada foi realizada de acordo Martins (2018). O capacitor  $C_e$ , o indutor  $L_e$  e a frequência de corte do filtro ( $f_e$ ) são dadas por (3), (4) e (5).

$$C_e = \frac{I_o}{4 \cdot f_s \cdot \Delta V_{CEmax}} \quad (3)$$

$$L_e = \frac{I_o}{31 \cdot f_s^2 \cdot C_e \cdot \Delta I_{Le_{max}}} \quad (4)$$

$$f_e = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_e \cdot C_e}} \quad (5)$$

Adotando-se um valor para  $f_e$  igual a um décimo da frequência de chaveamento ( $f_s$ ), tem-se (6).

$$f_s = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_e \cdot C_e}} \quad (6)$$

Substituindo-se (6) em (4) obtém-se (7).

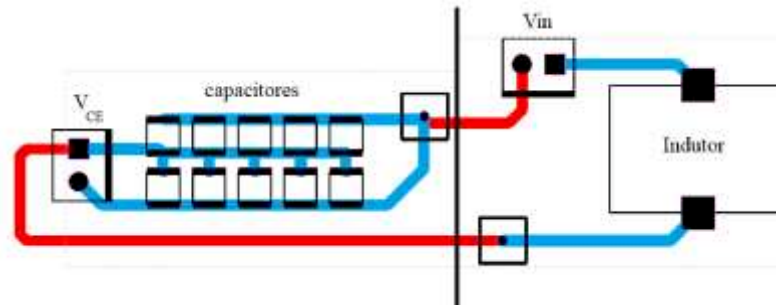
$$\Delta I_{L_{fmax}} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot I_o}{3100} \quad (7)$$

Como a corrente de saída ( $I_o$ ) é igual a 2,03 A, de acordo com a equação (7), o  $\Delta I_{L_{fmax}}$  será de 25,888 mA. Substituindo esse valor em (4) e considerando  $C_e$  igual a 47  $\mu\text{F}$ ,  $L_e$  será igual a 23,887  $\mu\text{H}$ . O indutor escolhido para o projeto foi um TDK® (60B683C) de 68  $\mu\text{H}$ .

#### 4.1.2 Elaboração e montagem do protótipo do conversor *Forward*

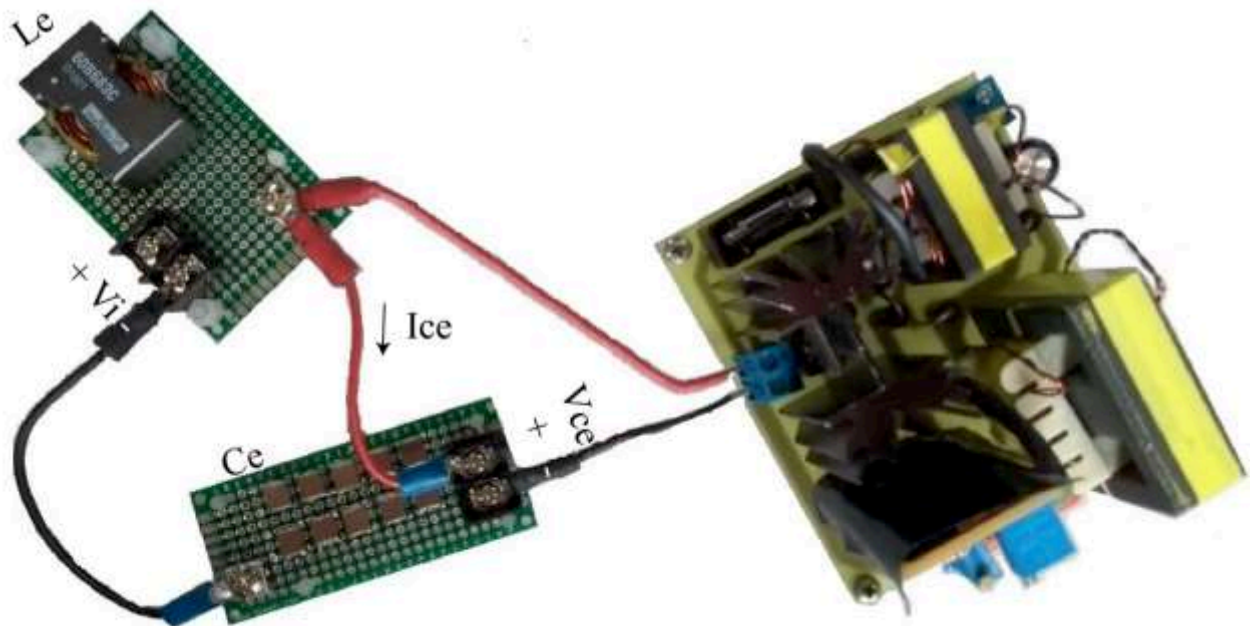
A construção do protótipo foi feita em duas placas de circuito impresso comerciais. A Figura 15 mostra o diagrama esquemático do filtro de entrada e a Figura 16 mostra o protótipo pronto. As medições de tensão e corrente estão indicadas na Figura 16.

Figura 15 – Conversor *Forward* - diagrama esquemático



Fonte: Autoria Própria

Figura 16 – Conversor *Forward* – protótipo construído



Fonte: Autoria própria

### 4.1.3 Resultados experimentais

Não foi possível extrair dados satisfatórios para se calcular a capacitância dos capacitores utilizados no experimento, pois houve muitos ruídos na leitura da tensão e da corrente.

Quando cabos e fios longos são inseridos no circuito, indutâncias parasitas surgem, podendo comprometer a medição do sinal. Assim, os principais motivos dessa obtenção de dados insatisfatórios provavelmente foram: a ponteira de medição da tensão, o projeto do protótipo, e a baixa potência do conversor.

Assim, foi necessário a construção de um outro conversor. Para diminuir o uso de componentes foi construído um conversor *Buck* de 500 W.

## 4.2 PROTÓTIPO 2 – CONVERSOR *BUCK*

O segundo protótipo construído foi um conversor *Buck* cujas especificações são:

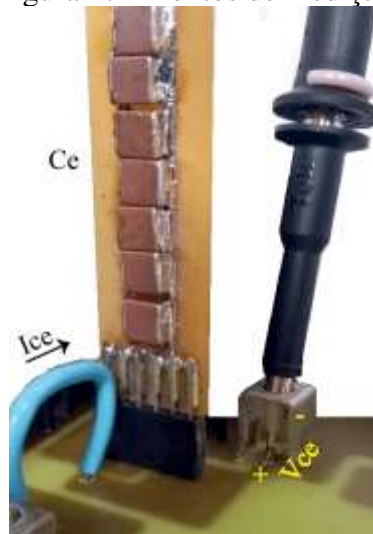
- Potência ( $P$ ): 500 W;
- Tensão de entrada ( $V_i$ ): 100 V;
- Variação máxima da corrente no indutor de saída ( $\Delta I_{Lo}$ ): 17,08 %;
- Variação máxima da tensão na saída ( $\Delta V_o$ ): 1,87 %;
- Variação máxima da corrente no indutor de entrada ( $\Delta I_{Le}$ ): 0,947 %;
- Variação máxima da tensão no capacitor de entrada ( $\Delta V_{Ce}$ ): 4,74 %;
- Frequência de chaveamento ( $f_s$ ): 40 kHz;
- Resistência de carga ( $R_o$ ): 5,7  $\Omega$ .

O “APÊNDICE C – Projeto do Protótipo 2 (*Buck*)” apresenta o projeto desse conversor detalhadamente.

### 4.2.1 Construção do protótipo do conversor *Buck*

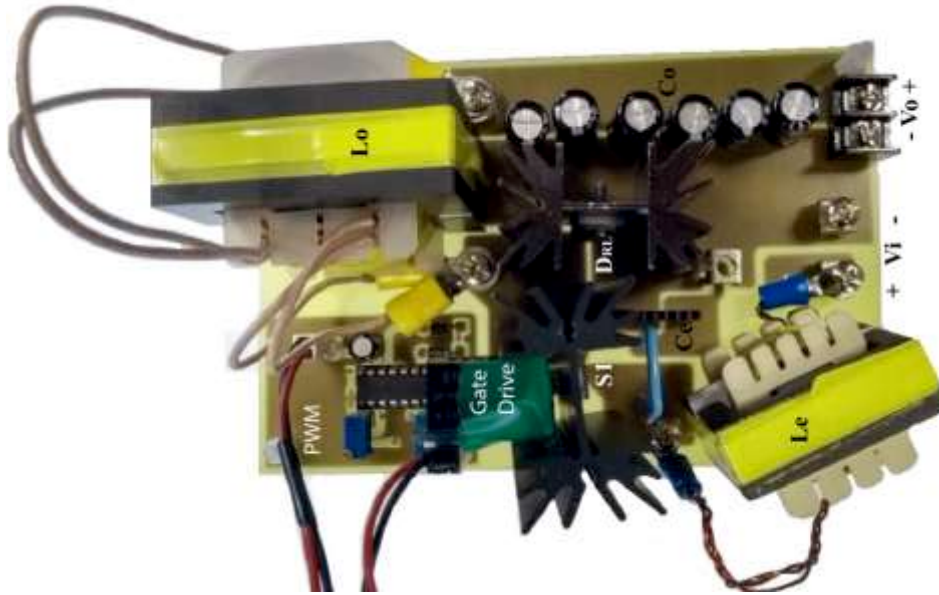
A construção do protótipo foi feita em uma única placa. Para diminuir os ruídos, foi criado um ponto de medição de tensão com conector *Keystone 7772-3* de modo que o laço de medição de tensão fosse o menor possível. Além disso, foi colocado o menor tamanho possível de cabo para medir a corrente. Lembrando que esses pontos de medições são colocados para medir a tensão ( $V_{CE}$ ) e a corrente ( $I_{CE}$ ) do capacitor do filtro de entrada como explicado no item 3.3. A Figura 17 mostra esses pontos de medição e a Figura 18 mostra o protótipo do conversor *Buck*.

Figura 17 – Pontos de medição



Fonte: Autoria própria

Figura 18 – Conversor Buck - protótipo construído



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Resultados experimentais e de simulação

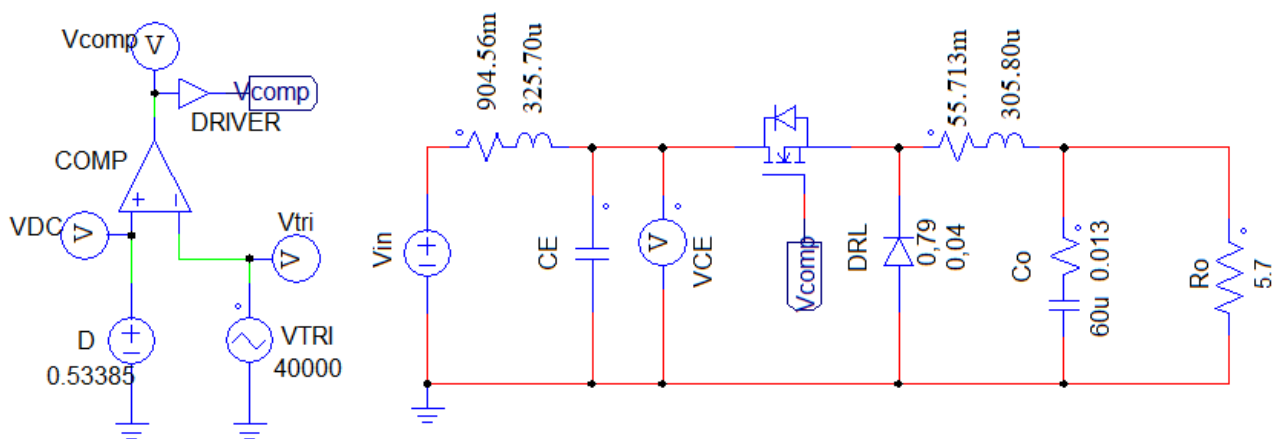
Para validar o método de medição proposto na seção 3.3 primeiramente foi medida a capacitância de dois capacitores com capacitância fixa, nesse caso, dois de poliéster. Após a comprovação do método foi feita a verificação dos dados apresentados pelo fabricante do capacitor cerâmico classe II utilizado, a fim de observar a dependência da capacitância com a tensão desses capacitores. Esse processo foi feito em simulação e experimentalmente.

A simulação foi feita pelo software *PSIM*<sup>®</sup>, utilizando os parâmetros apresentados em “APÊNDICE C – Projeto do Protótipo 2 (*Buck*)”. A Figura 19 mostra o circuito simulado.

O “APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck” além de mostrar as formas de ondas da tensão  $V_{CE}$  e da corrente  $I_{CE}$  simuladas e experimentais, apresenta os cálculos de capacitância de cada medição.

Lembrar que apesar da capacitância da simulação não apresentar tolerância, ou seja, ela é constante, os resultados obtidos apresentaram divergências por serem resultados calculados a partir das formas de onda do simulador.

Figura 19 – Conversor Buck construído no simulador *PSIM*<sup>®</sup>



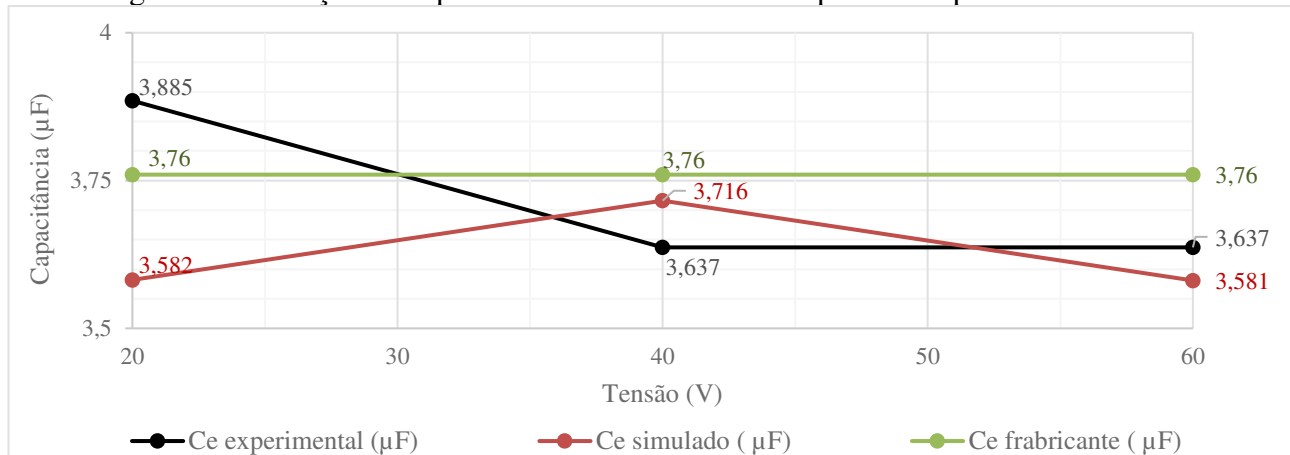
Fonte: Autoria Própria

#### 4.2.2.1 Capacitor de Poliéster de 470 nF

Foram utilizados oito capacitores de poliéster de 470 nF associados em paralelo, resultando em 3,76  $\mu\text{F}$ . Como o capacitor tem tolerância de 5%, podemos considerar que a capacitância pode variar de 3,572  $\mu\text{F}$  a 3,948  $\mu\text{F}$ . Os valores da capacitância desse conjunto de capacitores foram obtidos através da medição da tensão e da corrente em três diferentes momentos, quando a tensão  $V_{CE}$  foi igual a 20 V, 40 V e 60 V (APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck).

A Figura 20 apresenta os resultados experimentais e simulados da relação da capacitância com a tensão. Percebe-se que a tensão desse conjunto de oito capacitores de poliéster se mantém praticamente constante, dentro do erro de 5% apresentado pelo fabricante.

Figura 20 – Relação da capacitância com a tensão do capacitor de poliéster de 470 nF



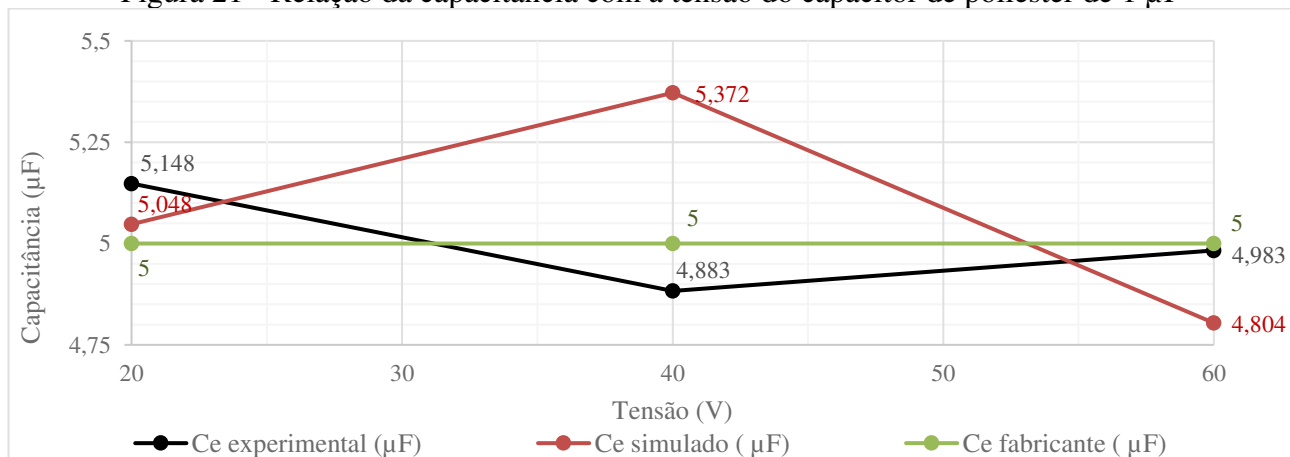
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2.2 Capacitor de Poliéster de 1 $\mu\text{F}$

Foram utilizados cinco capacitores de poliéster de 1  $\mu\text{F}$  associados em paralelo, resultando em 5  $\mu\text{F}$ . Como o capacitor tem tolerância de 5%, podemos considerar que a capacitância pode variar de 4,75  $\mu\text{F}$  a 5,25  $\mu\text{F}$ . Os valores da capacitância desse conjunto de capacitores foram calculados a partir da medição da tensão e da corrente em três diferentes momentos, quando a tensão  $V_{CE}$  foi igual a 20 V, 40 V e 60 V (APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck).

A Figura 21 apresenta os resultados experimentais e simulados da relação da capacitância com a tensão. Percebe-se que a tensão desse conjunto de cinco capacitores de poliéster se mantém praticamente constante, dentro do erro 5% apresentado pelo fabricante.

Figura 21 - Relação da capacitância com a tensão do capacitor de poliéster de 1  $\mu\text{F}$



Fonte: Autoria própria

Pode-se concluir que o método de medição apresentado na seção 3.3 foi validado, uma vez que foi possível mensurar a capacitância dos capacitores de poliéster nas seções 4.2.2.1 e 4.2.2.2.

#### 4.2.2.3 Capacitor cerâmico classe II de 4,7 $\mu\text{F}$

Foram utilizados dez capacitores cerâmicos de 4,7  $\mu\text{F}$  (*TKD<sup>®</sup>/CGA9N2X7R2A475K230KA*) associados em paralelo, resultando em 47  $\mu\text{F}$ . Os valores da capacitância desse conjunto de capacitores foram calculados a partir da medição da tensão e da corrente em nove diferentes momentos. Como esse capacitor varia sua capacitância com a tensão, segue os dados de referência de tensão e capacitância retirado da folha de dados deste capacitor na Tabela 4. As medições foram feitas nas mesmas tensões que o fabricante fornece a fim de compará-las (APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck).

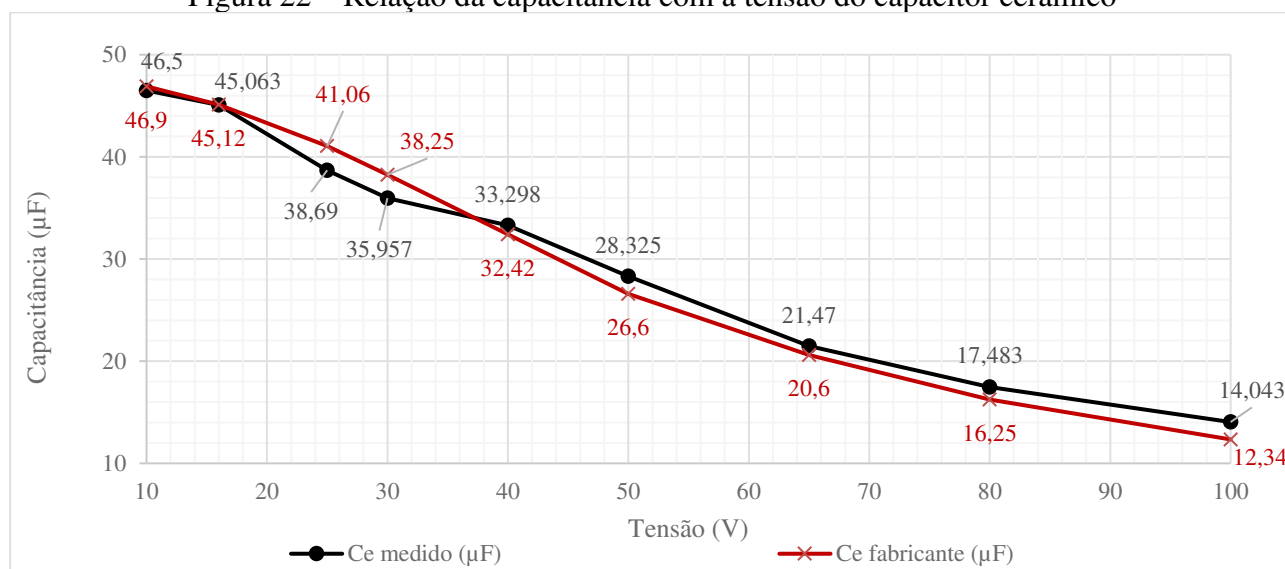
A Figura 22 apresenta os resultados experimentais da relação da capacitância com a tensão. Percebe-se que a tensão desse conjunto de dez capacitores cerâmicos varia como esperado pelos dados do fabricante.

Tabela 4 – Especificação da capacitância pela tensão

Tensão (V)	Capacitância ( $\mu\text{F}$ )
10	46,90
16	45,12
25	41,06
30	38,25
40	32,42
50	26,60
65	20,60
80	16,25
100	12,34

Fonte: [https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part\\_no=CGA9N2X7R2A475K230KA](https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part_no=CGA9N2X7R2A475K230KA)

Figura 22 – Relação da capacitância com a tensão do capacitor cerâmico



Fonte: Autoria própria

A dependência da capacitância com a tensão dos capacitores cerâmicos classe II apresentada e comprovada na Figura 22 é muitas vezes vista de forma negativa na utilização desses capacitores em projetos, uma vez que a capacitância desses capacitores cerâmicos pode reduzir até 80 % o seu valor nominal, que é o valor apresentado no encapsulamento. A seção 5 trabalhou em cima dessa

característica para realizar um circuito que funciona como um capacitor variável cuja capacitância é controlada por uma fonte externa ao circuito principal.



## 5 ANÁLISE DO CAPACITOR VARIÁVEL CONTROLÁVEL

Esta seção apresenta o estudo da medição da capacitância de um banco de capacitores de capacitância variável controlável proposto por Katsuki, Shirouzu, Hadara e Fujiwara (1993). Primeiramente, será apresentado o circuito do capacitor variável controlável utilizado, seguido dos resultados das medições feitas.

A simulação e o cálculo numérico foram feitas utilizando os softwares PSIM® e Mathcad®.

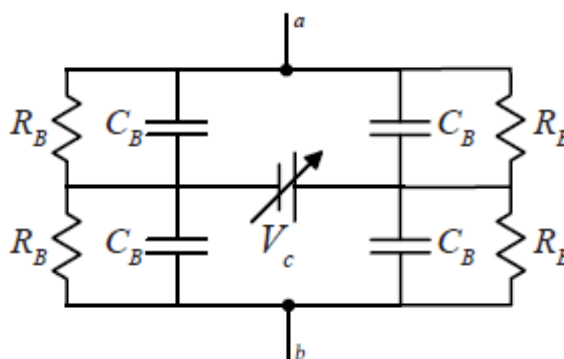
### 5.1 CAPACITOR VARIÁVEL CONTROLÁVEL

O capacitor variável controlável estudado (Figura 23) é constituído por quatro capacitores cerâmicos classe II ( $C_B$ ). Como visto anteriormente, os capacitores cerâmicos classe II tem sua capacitância decrescida com o aumento da tensão em seus terminais.

Usando os capacitores em uma estrutura de ponte pode-se controlar a capacitância desse dispositivo mudando a tensão de controle ( $V_C$ ), com uma fonte externa do circuito. Segundo Katsuki, Shirouzu, Hadara e Fujiwara (1993), a capacitância é determinada apenas pelo valor da tensão de controle ( $V_C$ ), ou seja, não depende da tensão aplicada nos pontos (a) e (b).

A capacitância resultante entre os pontos (a) e (b) nesse dispositivo é  $C_B$ . Os quatro resistores  $R_B$  são incluídos para balancear a ponte, impondo o mesmo valor médio de tensão ( $V_C/2$ ) nos quatro capacitores.

Figura 23 – Circuito do capacitor variável controlável



Fonte: Adaptado de Katsuki, Shirouzu, Hadara e Fujiwara (1993)

Como a capacitância equivalente do circuito do capacitor variável controlável é igual ao valor da capacitância dos capacitores utilizados em cada braço, espera-se que a capacitância equivalente do circuito varie do mesmo modo que a capacitância de cada braço varia.

Assim, foram construídos dois bancos de capacitores variáveis controláveis diferentes em 5.1.1. a fim de comprovar que a capacitância equivalente do circuito adquire as características dos capacitores utilizados em cada braço foi feita a medida da capacitância de um desses bancos.

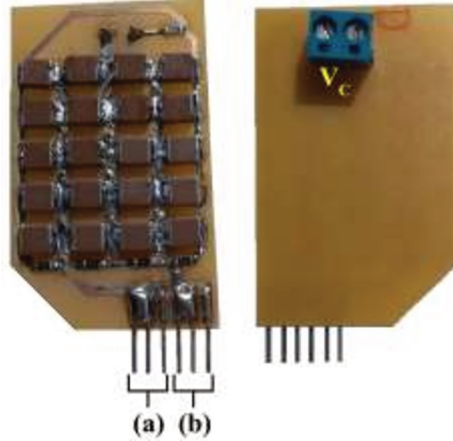
#### 5.1.1 Elaboração e montagem dos bancos de capacitores variáveis controláveis

Foram feitas duas placas distintas. A primeira (Placa 1 - Figura 24) com vinte capacitores  $CGA9N2X7R2A475K230KA$ , cinco por braço, resultando em um capacitor de capacitância máxima de  $23,5 \mu\text{F}$  e mínima de  $6,17 \mu\text{F}$ . Para varrer esse intervalo, é necessário mudar a tensão de controle até 200 V. Uma vez que a variação de cada braço é de  $V_C/2$  e a tensão nominal dos capacitores utilizados é de 100 V.

A segunda (Placa 2 - Figura 25) com quarenta capacitores  $C1206C106K4RAC7800$ , dez por braço, resultando em um capacitor variável de capacitância máxima de  $100 \mu\text{F}$  e mínima de  $25,25 \mu\text{F}$ . Para varrer esse intervalo, é necessário mudar a tensão de controle até 32 V, uma vez que a variação de cada braço é de  $V_C/2$  e a tensão nominal dos capacitores utilizados é de 16 V.

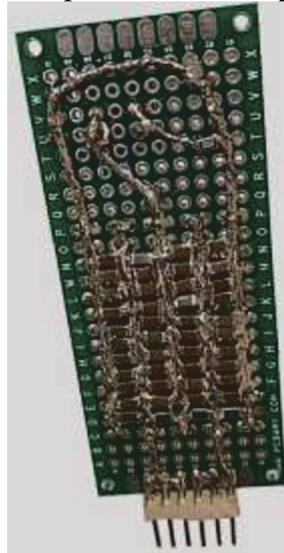
O valor de resistência  $R_B$  colocado em ambas as placas foi de  $10 \text{ k}\Omega$ .

Figura 24 – Placa 1 - Banco de capacitores com capacitância variável controlável



Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Placa 2 – Banco de capacitores com capacitância variável controlável



Fonte: Autoria Própria

## 5.2 MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA DO BANCO DE CAPACITORES

Visando provar que a capacitância equivalente do circuito da Figura 23 varia conforme a capacitância dos capacitores utilizados em cada braço varia foi feita a medição da capacitância do banco de capacitâncias construídos na Placa 1.

### 5.2.1 Medição com protótipo 2 (conversor Buck)

A primeira tentativa para realizar a medição do conversor foi feita utilizando o protótipo 2 (conversor Buck). A placa do banco de capacitores foi posicionada no lugar do capacitor do filtro de entrada ( $C_E$ ) no protótipo 2 como visto na Figura 17.

A medição foi feita como escrito no item 4.2. Como mostrado anteriormente a tensão em cada braço do banco de capacitores varia  $V_C/2$ . Sabendo que a tensão nominal dos capacitores usados é de 100 V, a tensão  $V_C$  teria que variar de 0 V a 200 V.

Apesar de ter sido provada a viabilidade do método conforme visto no item 4.2.2, não foi possível realiza-lo pois no momento da execução dos testes não havia fontes de tensão suficiente para atingir a tensão de 200 V. Por isso foi necessário achar uma nova forma de realizar a medida da capacitância que não estava prevista anteriormente. Essa nova forma consistiu em utilizar um analisador de impedâncias.

## 5.2.2 Medição com analisador de impedâncias

O analisador de impedâncias foi utilizado para medir a capacitância equivalente do banco de capacitores enquanto a tensão de controle  $V_C$  variava.

Para a medição, os terminais (a) e (b) (Figura 23) foram colocados nos terminais do analisador de impedâncias. A tensão  $V_C$  foi alimentada por três fontes de tensão DC em série (33 V/35 V/30 V). Um ponto importante de ser lembrado é que a tensão nos terminais (a) e (b) nesse experimento são muito próximos de 0 V. Se os resistores fossem idênticos a tensão seria nula, mas como os resistores usados têm uma tolerância, no final existe uma tensão bem pequena nesses terminais.

Assim, considerando nula a tensão  $V_{ab}$ , para que fosse atingida a tensão nominal dos capacitores utilizados era necessário que a tensão  $V_C$  atingisse 200 V. Devido à falta de uma fonte confiável que fosse até 200 V e pela segurança do analisador de impedância, não foi possível atingir a tensão nominal de cada capacitor que é de 100 V.

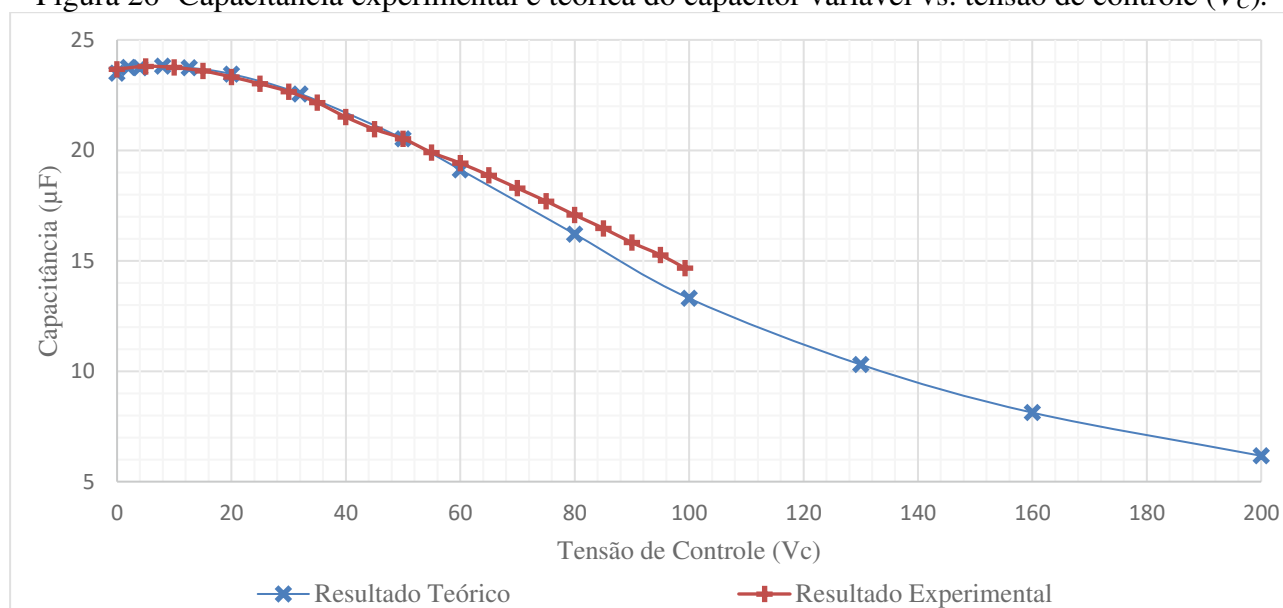
Pelo resultados apresentados na Figura 26 e Tabela 5, foi provado que variando a tensão de controle até 99,3V a capacitância equivalente do circuito varia conforme a variação esperada de cada braço, conforme os dados disponibilizados pelo fabricante.

Assim, admitindo que a variação iria seguir conforme o esperado em todo o intervalo de 0 a 200 V a Placa 1 foi utilizada para realizar um retificador de onda completa com capacitor série, apresentado na próxima seção.

A Placa 2 não teve a capacitância medida, pois foi construída após a realização dos testes com a Placa 1. Depois de perceber que os testes da Placa 1 não foram realizados por completo devido à falta de fontes e insegurança de utilizar uma fonte muito alta no analisador de impedância, teve-se a ideia de utilizar um outro capacitor cerâmico classe II com tensão nominal que fosse possível a realização das medições. No entanto devido a situação criada pela pandemia da covid-19 não foi possível realizá-las devido o fechamento dos laboratórios da universidade.

Assim, admitiu-se que o valor da capacitância equivalente da Placa 2 seguia os valores esperados de capacitância de cada braço, que por sua vez seguia os valores de capacitância apresentados na folha de dados do fabricante. A Placa 2 também foi utilizada na seção 6 no retificador de onda completa.

Figura 26- Capacitância experimental e teórica do capacitor variável vs. tensão de controle ( $V_C$ ).



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Relação da capacitância equivalente do banco (Placa 1) com a tensão de controle  $V_c$ 

$V_c$ (V)	$C_{eq}$ ( $\mu F$ )
0	23,673
5	23,807
10	23,752
15	23,596
20	23,325
25	23,011
30	22,659
35	22,159
40	21,507
45	20,956
50	20,526
55	19,904
60	19,419
65	18,869
70	18,286
75	17,700
80	17,070
85	16,473
90	15,824
95	15,262
99,3	14,662

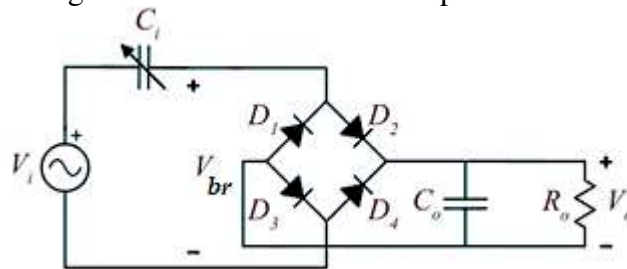
Fonte: Autoria própria

## 6 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM CAPACITOR SÉRIE COM A FONTE DE ENTRADA

O retificador a ser proposto (Figura 27) pode ser utilizado em equipamentos que requerem alimentação não isolada em baixa tensão contínua. A ideia do seu funcionamento é bem simples. Uma impedância capacitiva é colocada em série com a fonte de tensão alternada de entrada para reduzir a tensão contínua de saída. A ponte de diodo é usada para retificar a tensão alternada. Por fim, a forma de onda é filtrada por um capacitor de grande capacitância. Uma variação na impedância capacitiva acarretará na variação da tensão de saída do circuito (SOKAL; SUM; HAMILL, 1998).

O modelo de retificador com capacitor em série na entrada não é nova. Já usada desde 1970s. A ideia de se usar um capacitor variável em circuitos de eletrônica de potência também não. A novidade proposta neste capítulo é a utilização adaptada do modelo proposto de capacitor variável controlável da seção 5 no circuito de retificador de onda completa com capacitor série.

Figura 27 – Retificador com capacitor série



Fonte: Autoria Própria

### 6.1 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DO CIRCUITO

A análise da operação do circuito será feita conforme descrito por Sokal, Sum e Hamill (1998), ou seja, considerando  $C_i$  uma variável na solução.

A análise foi dividida em quatro períodos. A análise foi feita considerando todos os componentes ideais, com exceção dos diodos que apresentaram a tensão *threshold*  $V_D$  durante a condução. Primeiramente, o capacitor de saída  $C_o$  foi considerado infinito. Posteriormente, foi feita a correção da ondulação considerando um capacitor  $C_o$  finito.

A tensão da fonte de entrada  $v_i$  está apresentada em (8), onde  $V_I$  é o valor eficaz da tensão e  $f$  a frequência da onda.

$$v_i(t) = \sqrt{2} \cdot V_I \cdot \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

#### 6.1.1 Intervalo 1: $0 \leq t \leq t_1$

Para a análise, considera-se o início do período ( $t = 0, T, 2T$ ) quando a tensão de entrada se encontra no pico ( $\sqrt{2}V_I$ ). Nesse ponto, a corrente que circula no capacitor de entrada  $C_i$  será nula, pois o  $dv_i/dt$  é nulo. Os diodos  $D_2$  e  $D_3$  param de conduzir, e o capacitor  $C_i$  permanece carregado, de modo que a tensão sobre seus terminais será:

$$v_C(t) = \sqrt{2} \cdot V_I - V_O \quad (9)$$

A tensão na entrada da ponte de diodos ( $v_{br}$ ) irá variar junto com a tensão de entrada como mostrado em (10) até chegar em  $-(V_O + 2V_D)$  quando  $t = t_1$  onde  $D_1$  e  $D_4$  começam a conduzir.

$$v_{br}(t) = V_O - \sqrt{2} \cdot V_I [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (10)$$

Assim,  $t_1$  será:

$$t_1 = \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{\sqrt{2}(V_O + V_D)}{V_I} \right] \cdot \frac{1}{2\pi f} \quad (11)$$

### 6.1.2 Intervalo 2: $t_1 \leq t \leq t_2$

Em  $t_1$ , os diodos  $D_1$  e  $D_4$  começam a conduzir. Assim, a tensão na entrada da ponte de diodos ( $v_{br}$ ) será de  $-(V_o + 2V_D)$ . Logo, a tensão sobre o capacitor de entrada será:

$$v_C(t) = \sqrt{2} \cdot V_I \cdot \cos(2\pi ft) + V_o + 2V_D \quad (12).$$

A tensão varia conforme (12) até o instante  $t_2$ , onde os diodos  $D_1$  e  $D_4$  param de conduzir e a tensão sobre o capacitor ( $v_C$ ) será  $-\sqrt{2} \cdot V_I + V_o$ .

A corrente de entrada ( $i_I$ ) é dada pela abaixo.

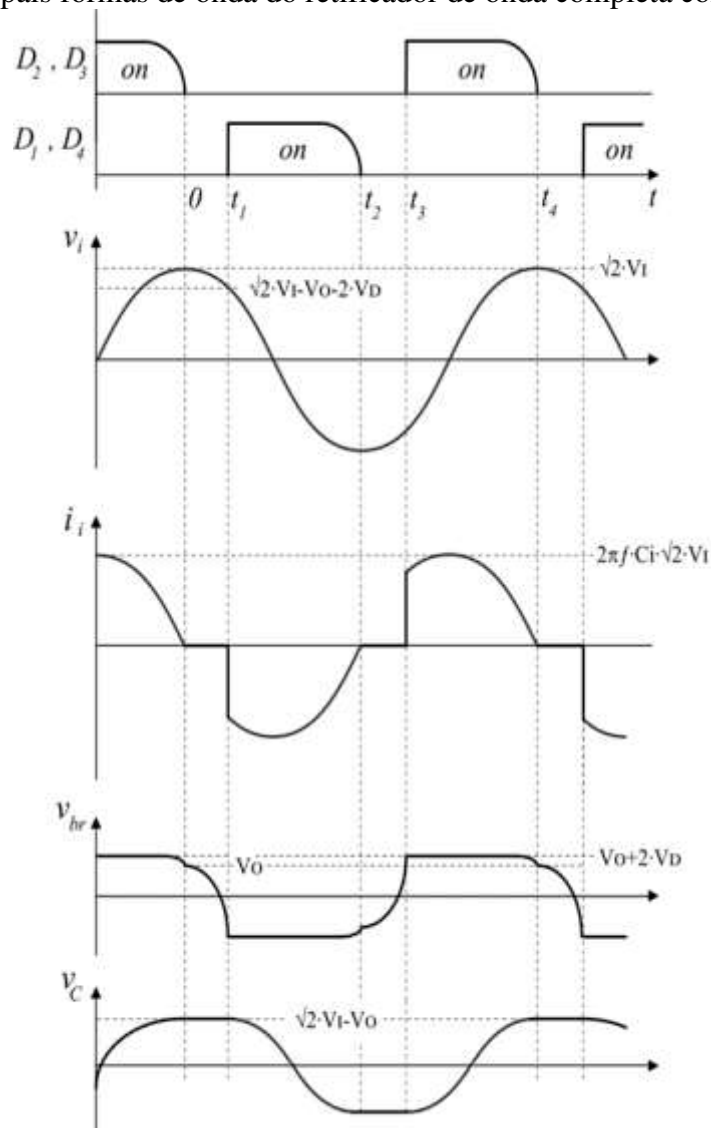
$$i_I(t) = C \frac{dv_C}{dt} = -2\pi f \cdot C \cdot \sqrt{2} \cdot V_I \cdot \sin(2\pi ft) \quad (13)$$

### 6.1.3 Intervalo 3: $t_2 \leq t \leq t_3$ e Intervalo 4: $t_3 \leq t \leq t_4$

Os intervalos 3 e 4 são similiares aos intervalos 1 e 2, respectivamente. No entanto, as tensões e correntes são inversas.

Na Figura 28 são mostradas as principais formas de onda desse retificador.

Figura 28 – Principais formas de onda do retificador de onda completa com capacitor série



Fonte: Adaptado de Sokal, Sum e Hamill (1998)

## 6.2 Características estáticas de carga

Através das equações anteriormente apresentadas, a corrente na carga ( $I_o$ ) será:

$$I_o = \frac{2\pi f}{\pi} \cdot \int_{t_2}^{t_4} i_i(t) dt = 4f \cdot C (\sqrt{2}V_I - V_o - V_D) \quad (14).$$

Sabendo que  $V_o = I_o R_o$ , a tensão de saída ( $V_o$ ) é:

$$V_o = \frac{2 \cdot R_o}{\pi \cdot X} \cdot \frac{\sqrt{2}V_I - V_D}{1 + \frac{2 \cdot R_o}{\pi \cdot X}} \quad (15)$$

onde  $R_o$  é a carga resistiva,  $V_I$  o valor eficaz da tensão de entrada,  $V_D$  é a tensão *threshold* de um diodo da ponte de diodo e  $X$  é a magnitude da reatância capacitiva do capacitor de entrada  $C_i$  (16).

$$X = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_i} \quad (16)$$

O capacitor utilizado na saída  $C_o$  irá determinar a ondulação ( $r$ ) da tensão de saída  $V_o$ . Assim, o valor da tensão  $V_o$  não será o valor calculado anteriormente será:

$$V_{ocorrigido} = V_o \cdot \left(1 - \frac{r}{2}\right) \quad (17).$$

A ondulação ( $r$ ) é definida como o quociente da variação da tensão de saída com  $V_{ocorrigido}$  (18), além disso pode ser aproximado (19).

$$r = \frac{\Delta V_o}{V_{ocorrigido}} \quad (18)$$

$$r \approx \frac{0.24 - 0.10 \cdot \log_{10}(X/R_o)}{f \cdot C_o \cdot R_o} \quad (19)$$

As equações (15), (16), (17), (18) e (19) foram utilizadas para determinar quais intervalos de tensão de saída cada capacitor variável controlável (Placas 1 e 2) poderia atingir. Para isso, foi calculado primeiramente o módulo da reatância capacitiva do capacitor de entrada (16). Depois a tensão de saída (15) considerando um capacitor de saída infinito. Após isso, foi calculado a ondulação através da equação (19) e o valor da tensão de saída corrigido (17) considerando uma ondulação na tensão de saída. Por fim, foi calculado a variação da tensão de saída (18).

## 6.3 Projeto do retificador com capacitância série variável controlável

O retificador projetado apresenta as seguintes especificações:

- Valor eficaz da tensão de entrada:  $V_i = 15$  V;
- Frequência:  $f = 60$  Hz;
- Tensão *threshold* do diodo:  $V_D = 1$  V;
- Capacitor de saída  $C_o = 3.3$  mF.

O retificador foi testado com cinco cargas e a vazio para as duas placas de capacitores variáveis apresentados no item 5.1.1. Neste trabalho, adota-se o termo carga como sendo o valor ôhmico da resistência de saída.

As cargas utilizadas foram aquecedores elétricos *POWNER*<sup>®</sup>/ 2000 W/ 220 V. Cada aquecedor apresenta dois valores de resistência, por volta de 52  $\Omega$  e 26  $\Omega$ . Os cinco valores de carga foram

aproximadamente  $13 \Omega$ ,  $26 \Omega$ ,  $52 \Omega$ ,  $104 \Omega$  e  $208 \Omega$ , ou seja, combinações série e paralelo de dois e quatro aquecedores.

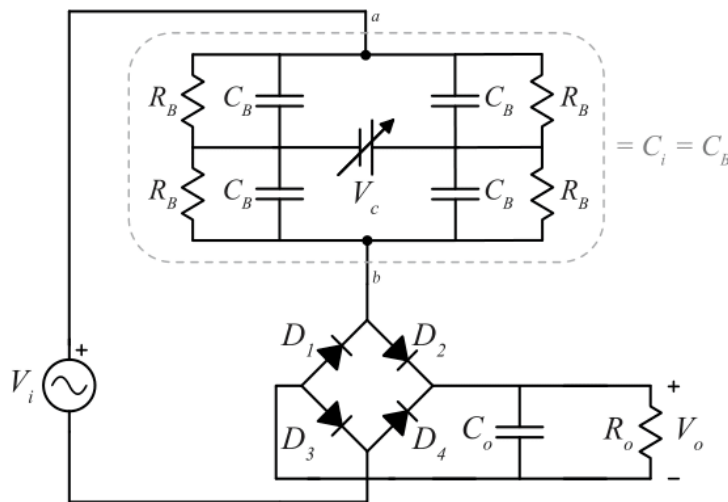
A ponte de diodo utilizada foi *Kbpc5010* e o capacitor de saída foi constituído de dez capacitores eletrolíticos associados em paralelo de  $330 \mu\text{F}/50 \text{ V}$ .

A fonte de tensão na entrada foi *IT7300* da *ITECH*®. E a tensão de controle utilizada foi *IT6500* da *ITECH*®.

### 6.3.1 Construção do retificador

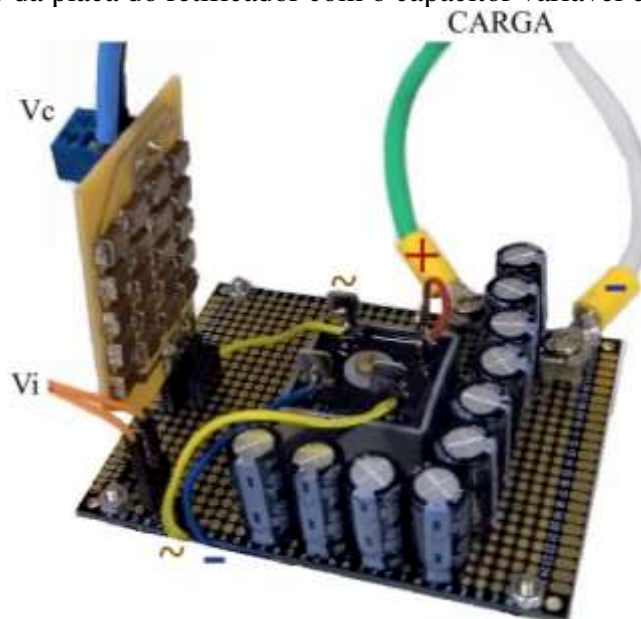
A Figura 29 retrata o circuito do retificador com o circuito do capacitor variável controlável. Já a Figura 30 apresenta a foto da placa do retificador com o capacitor variável controlável Placa1.

Figura 29 – Circuito completo do retificador com capacitor variável controlável série



Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Foto da placa do retificador com o capacitor variável controlável Placa1



Fonte: Autoria Própria

### 6.4 Resultados teóricos e de simulação

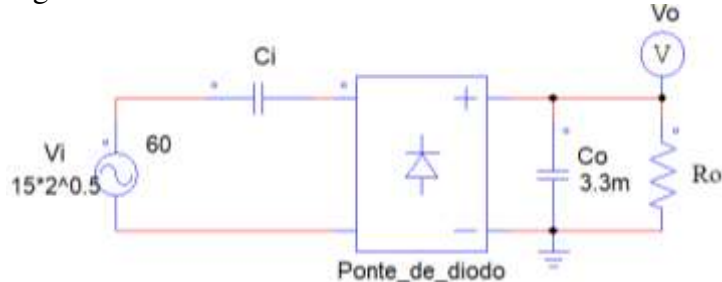
A validação das equações (15), (16), (17), (18) e (19) foi feita através da comparação dos resultados teóricos com os simulados.



Os resultados teóricos foram calculados em uma planilha *Excel*<sup>®</sup> utilizando as equações do item 6.2. Já simulação foi feita pelo software *PSIM*<sup>®</sup>. A Figura 31 mostra o circuito simulado.

Tanto no *Excel*<sup>®</sup> quanto no *PSIM*<sup>®</sup> utilizou-se os parâmetros apresentados no item 6.3. e admitiu-se que o valor da capacitância equivalente dos bancos de capacitores - Placas 1 e 2 (Figura 24 e Figura 25) - seguia os valores esperados de capacitância de cada braço, que por sua vez seguia os valores de capacitância por tensão apresentados na folha de dados do fabricante (APÊNDICE A – Dados técnicos dos capacitores utilizados).

Figura 31 – Retificador construído no simulador *PSIM*<sup>®</sup>



Fonte: Autoria Própria

### 6.4.1 Placa 1

Nesta seção serão apresentados os resultados teóricos e simulados do capacitor variável montado com capacitores *TKD*<sup>®</sup>/*CGA9N2X7R2A475K230KA*, cuja tensão nominal é 100 V e capacitância varia de 23,50  $\mu\text{F}$  a 6,17  $\mu\text{F}$ . Os valores de carga utilizados nessa seção foram os valores medidos das resistências usadas na parte experimental.

#### 6.4.1.1 Resultados teóricos

Os resultados teóricos foram calculados pelo *Excel*<sup>®</sup>. Para isso, foram substituídos os valores da capacitância pela tensão apresentados na folha de dados do capacitor utilizado (*TKD*<sup>®</sup>/*CGA9N2X7R2A475K230KA*) nas equações (15), (16), (17), (18) e (19), apresentadas no item 6.2. Os resultados da tensão de saída corrigida estão apresentados na Tabela 6, já o da corrente de saída na Tabela 7.

A Figura 32 apresenta o gráfico dos resultados teóricos da tensão de saída corrigida versus a tensão de controle ( $V_c$ ) do capacitor variável. Nela pode-se perceber que quanto maior a carga maiores são os valores de tensão na saída do conversor. E que quanto menor a capacitância, ou seja, maior a tensão de controle, menor a tensão de saída.

A Figura 33 apresenta o gráfico dos resultados teóricos da tensão de saída corrigida versus a corrente de saída. Nela pode-se perceber a influência da tensão de controle ( $V_c$ ) nos valores de tensão e de corrente na carga. As curvas da tensão de controle de 0V até 8V não estão bem claras no gráfico, pois neste intervalo de tensão de controle a capacitância varia muito pouco [23,5  $\mu\text{F}$  – 23,8  $\mu\text{F}$ ], fazendo com que a tensão de saída do retificador seja praticamente idêntica para esses valores de  $V_c$ .

É possível perceber, também, a regulação da tensão. Para um mesmo valor de  $V_c$ , quanto maior o valor da carga, maiores serão os valores de tensão na saída do conversor. Por exemplo, para a tensão de controle de 200V a tensão de saída varia de 21,213V (circuito aberto) para 0,332V (carga de 11,5  $\Omega$ ).

Além disso, percebe-se que é possível fazer o controle da tensão de saída, uma vez que para o mesmo valor de carga, aumentando o valor de  $V_c$  é possível diminuir o valor da tensão de saída. No entanto, para valores de carga muito baixos, a tensão de saída não varia muito, mesmo mudando o valor da tensão de controle. Por exemplo, para a carga de 215,8  $\Omega$  a tensão de saída varia de 11,061 V ( $V_c=0$  V) para 4,883V ( $V_c=100$  V), já para a carga de 11,5  $\Omega$ , a tensão de saída varia de 1,193V ( $V_c=0$  V) para 0,332 ( $V_c=100$  V).

Ademais, a partir desse gráfico é possível estimar o valor da tensão de saída para diferentes valores de carga ôhmicas.

Os demais resultados das equações do item 6.2 estão apresentados no “APÊNDICE E – Memória de cálculo do retificador”.

Tabela 6 - Placa 1 - Tensão de Saída Corrigida Teórica - *Vocorrigida* - (V)

Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ ) $V_C$ (V)	11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	aberto
		2,35E-05	0	1,193	2,260	4,599	7,498
2,38E-05	2	1,205	2,281	4,636	7,547	11,114	20,21
2,37E-05	4	1,205	2,280	4,636	7,546	11,113	20,21
2,38E-05	8	1,208	2,286	4,645	7,559	11,127	20,21
2,37E-05	12,6	1,204	2,280	4,635	7,545	11,112	20,21
2,35E-05	20	1,191	2,255	4,591	7,488	11,051	20,21
2,26E-05	32	1,149	2,180	4,456	7,307	10,858	20,21
2,05E-05	50	1,052	2,004	4,139	6,875	10,385	20,21
1,91E-05	60	0,984	1,881	3,912	6,559	10,028	20,21
1,62E-05	80	0,842	1,619	3,418	5,851	9,198	20,21
1,33E-05	100	0,697	1,349	2,895	5,066	8,221	20,21
1,03E-05	130	0,546	1,062	2,318	4,161	7,013	20,21
8,13E-06	160	0,434	0,849	1,876	3,433	5,971	20,21
6,17E-06	200	0,332	0,652	1,458	2,719	4,883	20,21

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 – Placa 1 – Corrente de Saída Teórica - *Io* - (A)

$V_C$ (V)	Carga ( $\Omega$ )	11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	aberto
		0	1,04E-01	9,91E-02	8,69E-02	7,11E-02	5,13E-02
2	1,05E-01	1,00E-01	8,76E-02	7,15E-02	5,15E-02	0	
4	1,05E-01	1,00E-01	8,76E-02	7,15E-02	5,15E-02	0	
8	1,05E-01	1,00E-01	8,78E-02	7,17E-02	5,16E-02	0	
12,6	1,05E-01	1,00E-01	8,76E-02	7,15E-02	5,15E-02	0	
20	1,04E-01	9,89E-02	8,68E-02	7,10E-02	5,12E-02	0	
32	9,99E-02	9,56E-02	8,42E-02	6,93E-02	5,03E-02	0	
50	9,15E-02	8,79E-02	7,82E-02	6,52E-02	4,81E-02	0	
60	8,56E-02	8,25E-02	7,39E-02	6,22E-02	4,65E-02	0	
80	7,32E-02	7,10E-02	6,46E-02	5,55E-02	4,26E-02	0	
100	6,06E-02	5,92E-02	5,47E-02	4,80E-02	3,81E-02	0	
130	4,75E-02	4,66E-02	4,38E-02	3,94E-02	3,25E-02	0	
160	3,77E-02	3,72E-02	3,55E-02	3,25E-02	2,77E-02	0	
200	2,89E-02	2,86E-02	2,76E-02	2,58E-02	2,26E-02	0	

Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Placa 1 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ )

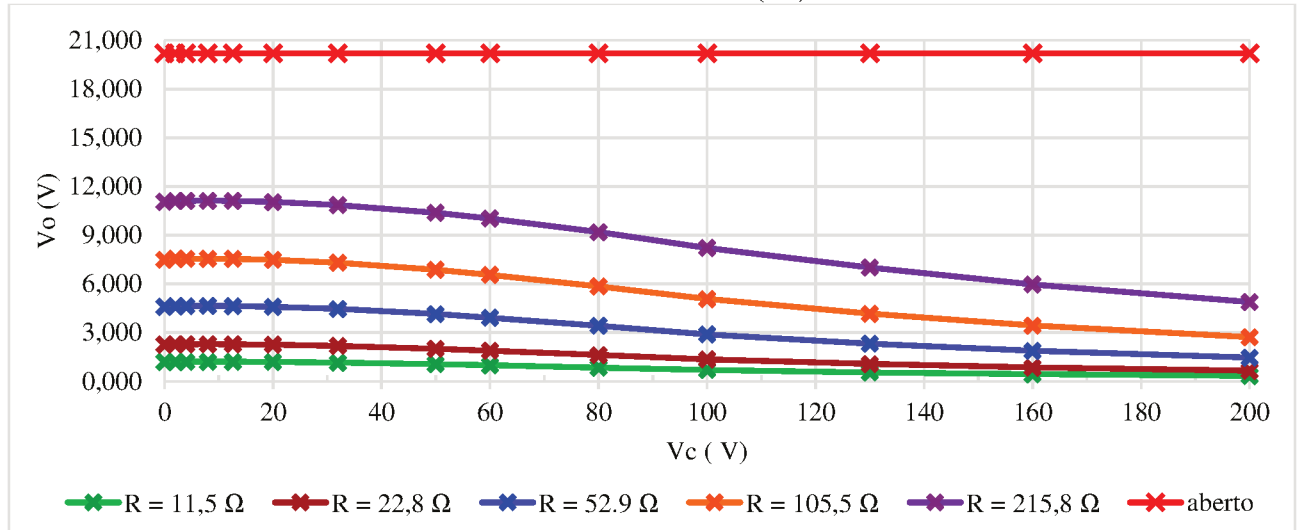
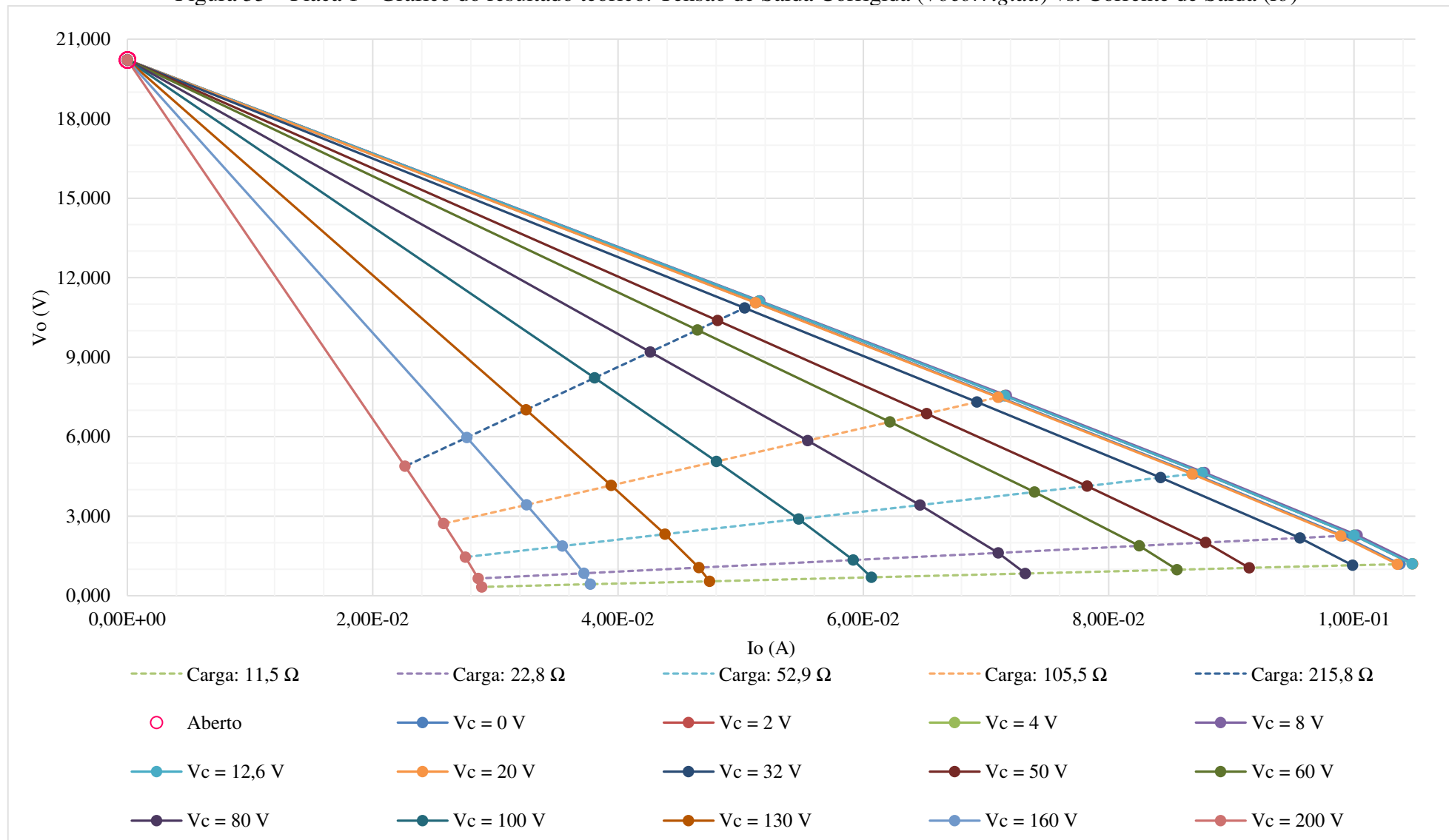


Figura 33 – Placa 1 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ )



Fonte: Autoria Própria

### 6.4.1.2 Resultados de simulação

Os resultados simulados foram obtidos a partir de simulações no *PSIM*<sup>®</sup>. Para isso, foram substituídos os valores da capacitância possíveis do capacitor utilizado e das resistências testadas nos componentes  $C_i$  e  $R_o$ , mostrados na Figura 31. Os resultados calculados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Placa 1 - Tensão de Saída Corrigida Simulada - *Vocorrigida* - (V)

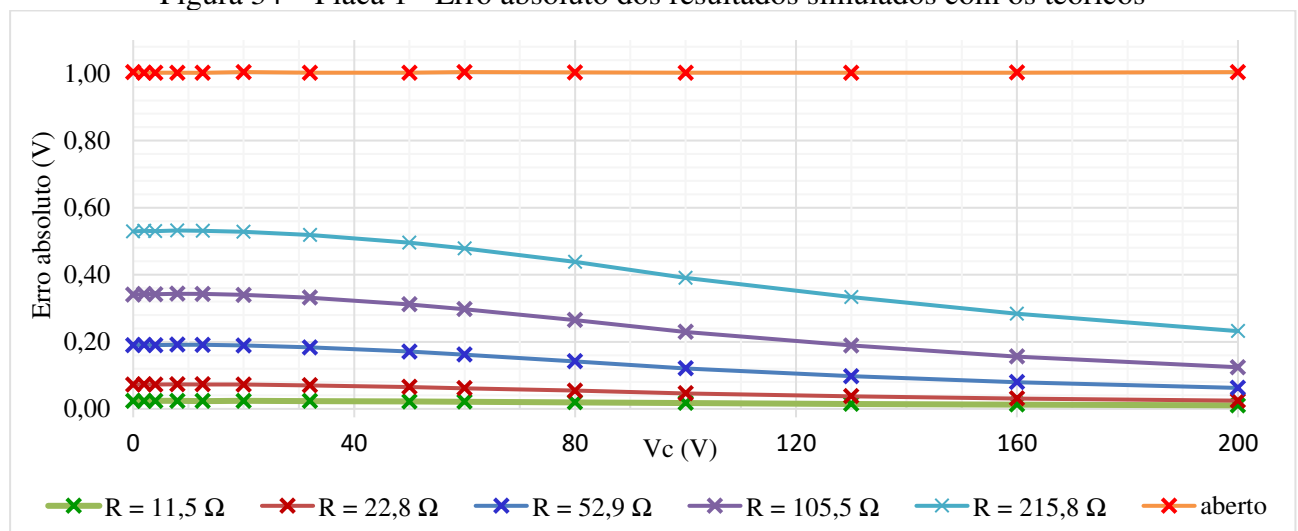
Capacitância (F)	Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	aberto
2,35E-05	0	1,17	2,19	4,41	7,16	10,53	19,21
2,38E-05	2	1,18	2,21	4,45	7,20	10,58	19,21
2,37E-05	4	1,18	2,21	4,45	7,20	10,58	19,21
2,38E-05	8	1,18	2,21	4,45	7,22	10,59	19,21
2,37E-05	12,6	1,18	2,21	4,44	7,20	10,58	19,21
2,35E-05	20	1,17	2,18	4,40	7,15	10,52	19,21
2,26E-05	32	1,13	2,11	4,27	6,98	10,34	19,21
2,05E-05	50	1,03	1,94	3,97	6,56	9,89	19,21
1,91E-05	60	0,96	1,82	3,75	6,26	9,55	19,21
1,62E-05	80	0,82	1,56	3,28	5,59	8,76	19,21
1,33E-05	100	0,68	1,30	2,77	4,84	7,83	19,21
1,03E-05	130	0,53	1,02	2,22	3,97	6,68	19,21
8,13E-06	160	0,42	0,82	1,80	3,28	5,69	19,21
6,17E-06	200	0,32	0,63	1,40	2,60	4,65	19,21

Fonte: Autoria Própria

### 6.4.1.3 Erro relativo

A Figura 34 mostra o erro relativo dos resultados simulados com os teóricos. Pode-se validar os resultados teóricos, uma vez que os valores das equações da seção 6.2 são bem próximas dos valores simulados, com um erro absoluto máximo de 1 V (circuito aberto). Vale lembrar que a ondulação foi definida como uma aproximação. Então os valores que das equações utilizadas já são valores aproximados.

Figura 34 – Placa 1 - Erro absoluto dos resultados simulados com os teóricos



Fonte: Autoria Própria

## 6.4.2 Placa 2

Nesta seção serão apresentados os resultados teóricos e simulados do capacitor variável montado com capacitores *Kemet®/c1206c106k4rac7800*, cuja tensão nominal é 16 V e capacitância varia de 100  $\mu\text{F}$  a 25,25  $\mu\text{F}$ . Os valores de carga utilizados nessa seção foram os valores medidos das resistências usadas na parte experimental.

### 6.4.2.1 Resultados teóricos

Os resultados teóricos foram calculados pelo *Excel®*. Para isso, foram substituídos os valores da capacitância pela tensão apresentados na folha de dados do capacitor utilizado (*Kemet®/c1206c106k4rac7800*) nas equações (15), (16), (17), (18) e (19), apresentadas no item 6.2. Os resultados calculados estão apresentados na Tabela 9 e Tabela 10.

A Figura 35 apresenta o gráfico dos resultados teóricos da tensão de saída corrigida versus a tensão de controle ( $V_C$ ) do capacitor variável. Nela pode-se perceber que quanto maior a carga maiores são os valores de tensão na saída do conversor. E que quanto menor a capacitância, ou seja, maior a tensão de controle, menor a tensão de saída.

Além disso, como a Placa 2 apresenta uma capacitância maior que a Placa 1 é visto que para uma mesma carga e para uma mesma tensão de controle, a tensão de saída obtida no retificador utilizando a Placa 2 é maior do que utilizando a Placa 1.

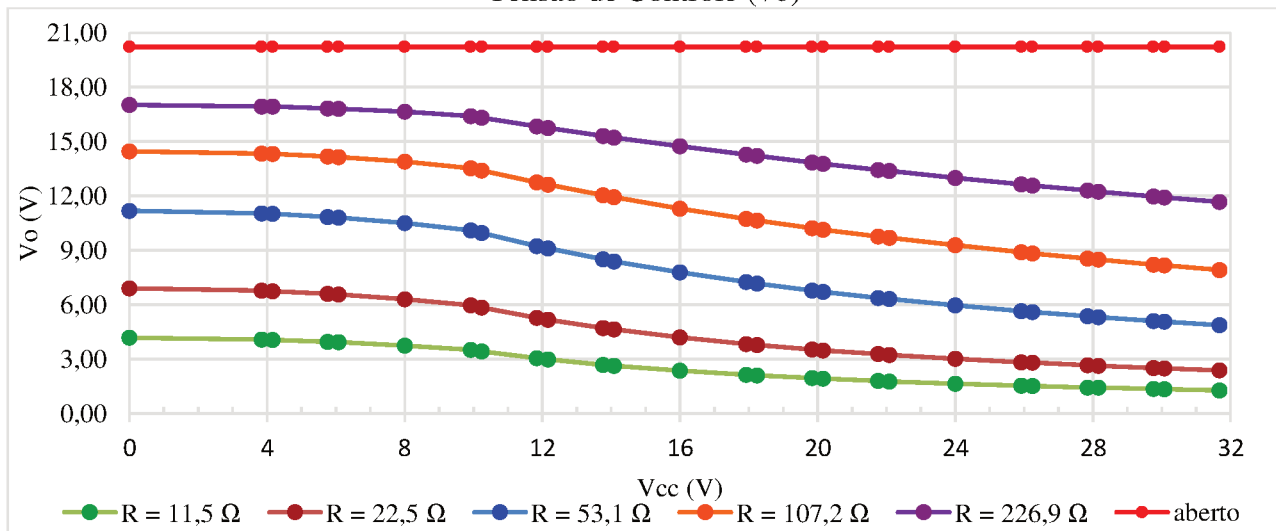
A Figura 36 apresenta o gráfico dos resultados teóricos da tensão de saída corrigida versus a corrente de saída. Nela pode-se perceber a influência da tensão de controle ( $V_C$ ) nos valores de tensão e de corrente na carga.

É possível perceber, também, a regulação da tensão. Para um mesmo valor de  $V_C$ , quanto maior o valor da carga, maiores serão os valores de tensão na saída do conversor. Além disso, percebe-se que é possível fazer o controle da tensão de saída, uma vez que para o mesmo valor de carga, aumentando o valor de  $V_C$  é possível diminuir o valor da tensão de saída. No entanto, para valores de carga muito baixos, a tensão de saída não varia muito, mesmo mudando o valor da tensão de controle.

Ademais, a partir desse gráfico é possível estimar o valor da tensão de saída para diferentes valores de carga ôhmicas.

Os demais resultados das equações do item 6.2 estão apresentados no “APÊNDICE E – Memória de cálculo do retificador”.

Figura 35 – Placa 2 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_C$ )



Fonte: Autoria Própria

Tabela 9- Placa 2 -Tensão de Saída Corrigida Teórica - *Vocorrigida* - (V)

Capacitância (F)	Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	aberto
1,00E-04	0	4,18	6,90	11,18	14,45	17,01	20,21
9,71E-05	3,84	4,08	6,77	11,03	14,33	16,93	20,21
9,65E-05	4,16	4,06	6,75	11,01	14,31	16,92	20,21
9,34E-05	5,76	3,96	6,60	10,84	14,17	16,83	20,21
9,26E-05	6,08	3,93	6,56	10,80	14,14	16,81	20,21
8,72E-05	8	3,75	6,31	10,51	13,88	16,64	20,21
8,03E-05	9,92	3,51	5,96	10,10	13,53	16,39	20,21
7,81E-05	10,24	3,43	5,85	9,96	13,41	16,31	20,21
6,76E-05	11,84	3,05	5,27	9,24	12,75	15,84	20,21
6,58E-05	12,16	2,98	5,17	9,11	12,62	15,75	20,21
5,81E-05	13,76	2,68	4,72	8,50	12,04	15,31	20,21
5,68E-05	14,08	2,63	4,63	8,39	11,92	15,22	20,21
5,00E-05	16	2,36	4,20	7,78	11,30	14,73	20,21
4,46E-05	17,92	2,14	3,84	7,25	10,74	14,27	20,21
4,39E-05	18,24	2,10	3,79	7,17	10,65	14,20	20,21
4,03E-05	19,84	1,95	3,54	6,79	10,23	13,84	20,21
3,96E-05	20,16	1,92	3,48	6,70	10,13	13,76	20,21
3,68E-05	21,76	1,80	3,28	6,38	9,77	13,44	20,21
3,62E-05	22,08	1,77	3,24	6,32	9,69	13,37	20,21
3,33E-05	24	1,64	3,02	5,96	9,28	12,99	20,21
3,09E-05	25,92	1,53	2,83	5,65	8,89	12,63	20,21
3,05E-05	26,24	1,52	2,80	5,60	8,83	12,58	20,21
2,87E-05	27,84	1,44	2,66	5,36	8,54	12,29	20,21
2,84E-05	28,16	1,42	2,63	5,32	8,49	12,24	20,21
2,69E-05	29,76	1,35	2,51	5,11	8,22	11,97	20,21
2,66E-05	30,08	1,34	2,49	5,07	8,17	11,92	20,21
2,53E-05	31,68	1,28	2,38	4,87	7,91	11,67	20,21

Fonte: Autoria Própria

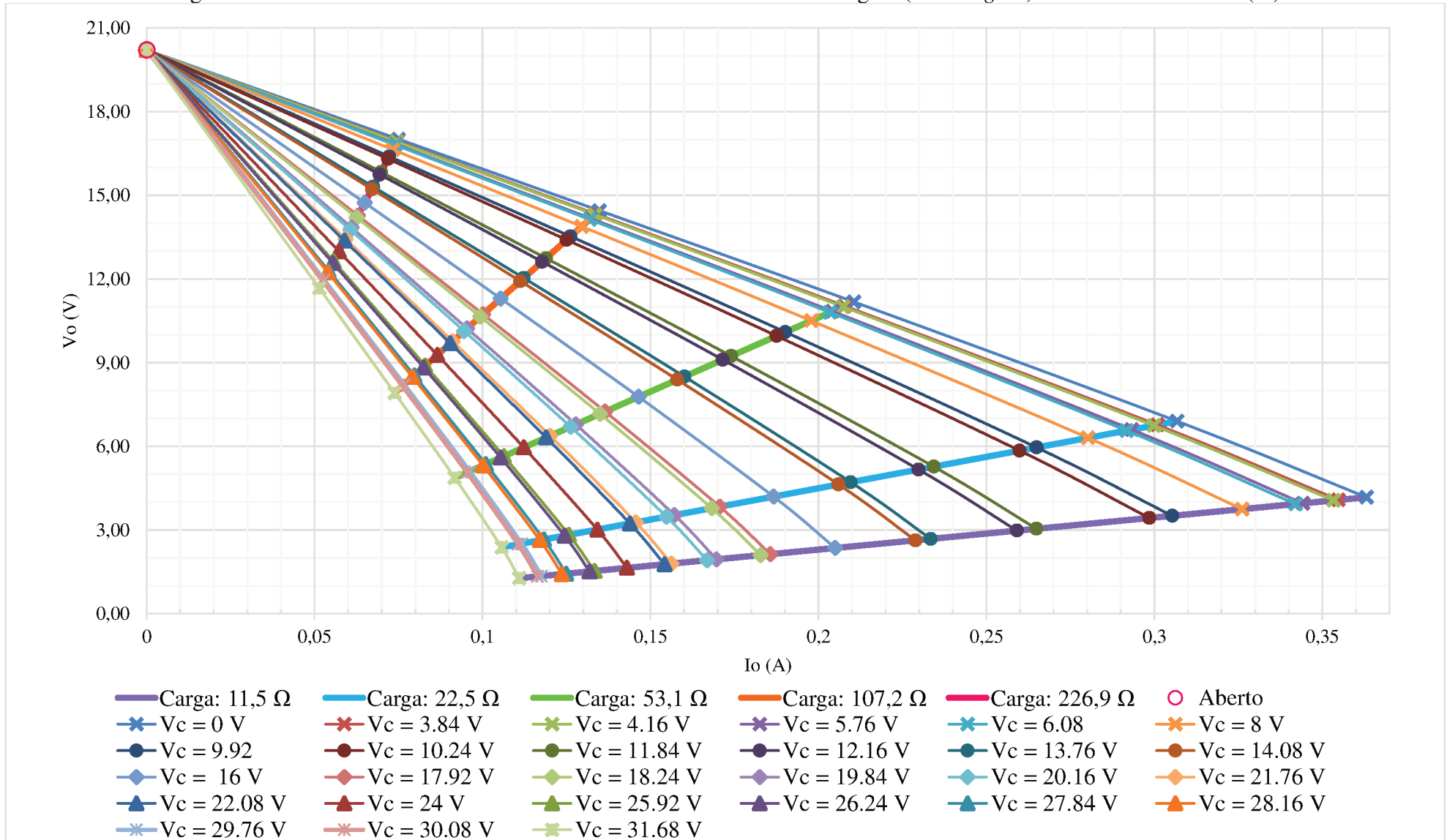
Tabela 10 - Placa 2 – Corrente de Saída Teórica -  $I_o$  - (A)

Vc (V)	Carga ( $\Omega$ )					
	11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	aberto
0	0,36318	0,306779	0,210554	0,134819	0,074984	2,02E-10
3,84	0,354835	0,300886	0,20779	0,133686	0,074633	2,02E-10
4,16	0,353382	0,299854	0,207303	0,133485	0,074571	2,02E-10
5,76	0,344241	0,293337	0,204199	0,132197	0,074168	2,02E-10
6,08	0,342066	0,291778	0,20345	0,131884	0,07407	2,02E-10
8	0,326156	0,280274	0,197846	0,129517	0,073319	2,02E-10
9,92	0,305342	0,264959	0,190164	0,126195	0,072246	2,02E-10
10,24	0,298544	0,259891	0,187565	0,12505	0,07187	2,02E-10
11,84	0,264946	0,234346	0,174008	0,118901	0,069801	2,02E-10
12,16	0,259108	0,229821	0,171524	0,117741	0,069401	2,02E-10
13,76	0,233432	0,209612	0,160109	0,11227	0,067468	2,02E-10
14,08	0,228902	0,205994	0,158008	0,111237	0,067094	2,02E-10
16	0,205019	0,186645	0,146463	0,105411	0,064935	2,02E-10
17,92	0,185661	0,170619	0,136488	0,100164	0,06291	2,02E-10
18,24	0,182799	0,168224	0,134963	0,099343	0,062586	2,02E-10
19,84	0,169664	0,15714	0,12779	0,095416	0,061008	2,02E-10
20,16	0,166849	0,154746	0,126215	0,094538	0,060648	2,02E-10
21,76	0,156206	0,14563	0,12013	0,091095	0,059216	2,02E-10
22,08	0,154181	0,143885	0,118948	0,090416	0,058929	2,02E-10
24	0,142997	0,13418	0,112285	0,086528	0,057256	2,02E-10
25,92	0,133333	0,125705	0,10633	0,08296	0,055675	2,02E-10
26,24	0,131874	0,124418	0,105414	0,082403	0,055424	2,02E-10
27,84	0,124934	0,118271	0,100999	0,079689	0,054186	2,02E-10
28,16	0,123618	0,1171	0,100149	0,079161	0,053942	2,02E-10
29,76	0,117484	0,111624	0,096143	0,076646	0,052764	2,02E-10
30,08	0,116356	0,110613	0,095397	0,076172	0,05254	2,02E-10
31,68	0,110893	0,1057	0,091744	0,073833	0,051418	2,02E-10

Fonte: Autoria Própria



Figura 36 – Placa 2 - Gráfico do resultado teórico: Tensão de Saída Corrigida ( $V_{ocorrigida}$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ )



Fonte: Autoria Própria

## 6.4.2.2 Resultados de simulação

Os resultados simulados foram obtidos a partir de simulações no *PSIM*<sup>®</sup>. Para isso, foram substituídos os valores da capacitância possíveis do capacitor utilizado e das resistências testadas nos componentes  $C_i$  e  $R_o$ , mostrados na Figura 31. Os resultados calculados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Placa 2 -Tensão de Saída Corrigida Simulada - *Vocorrigida* - (V)

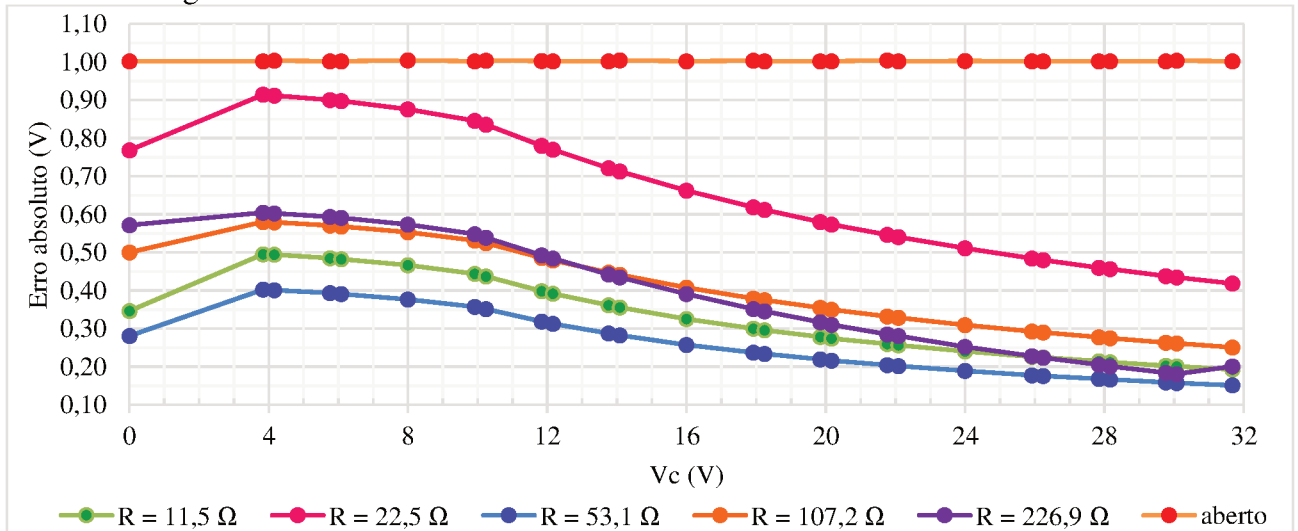
Capacitância (F)	$V_C$ (V)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	aberto
1,00E-04	0	4,29	6,85	10,83	13,86	16,22	19,21
9,71E-05	3,84	4,04	6,57	10,56	13,66	16,11	19,21
9,65E-05	4,16	4,02	6,55	10,54	13,63	16,09	19,21
9,34E-05	5,76	3,92	6,41	10,38	13,50	16,01	19,21
9,26E-05	6,08	3,89	6,37	10,34	13,47	15,98	19,21
8,72E-05	8	3,71	6,12	10,06	13,23	15,82	19,21
8,03E-05	9,92	3,47	5,79	9,67	12,89	15,59	19,21
7,81E-05	10,24	3,40	5,68	9,54	12,78	15,51	19,21
6,76E-05	11,84	3,01	5,12	8,85	12,15	15,07	19,21
6,58E-05	12,16	2,94	5,02	8,73	12,03	14,98	19,21
5,81E-05	13,76	2,65	4,58	8,15	11,48	14,56	19,21
5,68E-05	14,08	2,60	4,50	8,04	11,37	14,48	19,21
5,00E-05	16	2,33	4,07	7,46	10,78	14,02	19,21
4,46E-05	17,92	2,10	3,72	6,95	10,24	13,58	19,21
4,39E-05	18,24	2,07	3,67	6,87	10,16	13,51	19,21
4,03E-05	19,84	1,92	3,43	6,51	9,76	13,17	19,21
3,96E-05	20,16	1,89	3,38	6,43	9,67	13,10	19,21
3,68E-05	21,76	1,77	3,18	6,12	9,32	12,79	19,21
3,62E-05	22,08	1,74	3,14	6,06	9,25	12,73	19,21
3,33E-05	24	1,62	2,93	5,72	8,85	12,37	19,21
3,09E-05	25,92	1,51	2,74	5,41	8,49	12,02	19,21
3,05E-05	26,24	1,49	2,71	5,37	8,43	11,97	19,21
2,87E-05	27,84	1,41	2,58	5,14	8,15	11,70	19,21
2,84E-05	28,16	1,40	2,55	5,10	8,10	11,65	19,21
2,69E-05	29,76	1,33	2,43	4,90	7,84	11,40	19,21
2,66E-05	30,08	1,31	2,41	4,86	7,79	11,35	19,21
2,53E-05	31,68	1,25	2,30	4,67	7,55	11,07	19,21

Fonte: Autoria Própria

## 6.4.2.3 Erro relativo

A Figura 37 mostra o erro relativo dos resultados simulados com os teóricos. Pode-se validar os resultados teóricos, uma vez que os valores obtidos através das equações do item 6.2 são bem próximas dos valores simulados, com um erro absoluto máximo de 1 V (circuito aberto). Vale lembrar que a ondulação foi definida como uma aproximação. Então os valores que das equações utilizadas já são valores aproximados.

Figura 37 – Placa 2 - Erro absoluto dos resultados simulados com os teóricos



Fonte: Autoria Própria

## 6.5 Resultados experimentais

Para comprovar os resultados teóricos e da simulação foram feitas medições experimentais utilizando o protótipo apresentado na Figura 30.

A tensão foi medida através de um analisador de potência. A corrente chegou a ser medida pelo analisador de potência, no entanto como o valor medido não seguia a Lei de Ohm, eles foram desconsiderados. Assim o valor da corrente foi calculado como sendo o quociente da tensão medida com o valor da carga utilizada.

### 6.5.1 Placa 1

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais do capacitor variável montado com capacitores *TKD®/CGA9N2X7R2A475K230KA*, cuja tensão nominal é 100 V e capacitância varia de 23,50  $\mu\text{F}$  a 6,17  $\mu\text{F}$ .

Os resultados dos valores médios da tensão de saída estão apresentados na Tabela 12, já os valores médios da corrente de saída na Tabela 13.

A Figura 38 apresenta o gráfico dos resultados experimentais do valor médio da tensão de saída versus a tensão de controle do capacitor variável. A Figura 39 apresenta o gráfico dos resultados experimentais da tensão de saída corrigida versus a corrente de saída.

Tabela 12 - Placa 1 – Valor Médio da Tensão de Saída -  $V_o$  - (V)

Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
	11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	aberto
0	1,49	2,25	4,30	6,97	10,30	20,29
2	1,49	2,26	4,30	6,97	10,30	20,30
4	1,49	2,25	4,30	6,95	10,28	20,31
8	1,48	2,24	4,27	6,94	10,26	20,32
12,6	1,47	2,22	4,24	6,88	10,21	20,32
20	1,45	2,19	4,17	6,79	10,09	20,33
32	1,39	2,09	4,00	6,57	9,84	20,34
50	1,27	1,92	3,68	6,11	9,30	20,32
60	1,20	1,80	3,47	5,82	8,95	20,34
80	1,04	1,57	3,05	5,19	8,17	20,35
100	0,89	1,34	2,65	4,58	7,41	20,35
130	0,71	1,08	2,14	3,81	6,36	20,37
160	0,58	0,85	1,78	3,20	5,48	20,41
200	0,46	0,69	1,43	2,61	4,63	20,50

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 – Placa 1 – Valor Médio da Corrente de Saída -  $I_o$  - (A)

Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
	11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	aberto
0	1,29E-01	9,87E-02	8,13E-02	6,61E-02	4,77E-02	2,03E-09
2	1,30E-01	9,90E-02	8,13E-02	6,61E-02	4,77E-02	2,03E-09
4	1,30E-01	9,86E-02	8,12E-02	6,59E-02	4,77E-02	2,03E-09
8	1,29E-01	9,83E-02	8,07E-02	6,57E-02	4,76E-02	2,03E-09
12,6	1,28E-01	9,72E-02	8,02E-02	6,53E-02	4,73E-02	2,03E-09
20	1,26E-01	9,61E-02	7,89E-02	6,44E-02	4,68E-02	2,03E-09
32	1,21E-01	9,18E-02	7,57E-02	6,23E-02	4,56E-02	2,03E-09
50	1,10E-01	8,43E-02	6,96E-02	5,79E-02	4,31E-02	2,03E-09
60	1,04E-01	7,88E-02	6,56E-02	5,51E-02	4,15E-02	2,03E-09
80	9,01E-02	6,90E-02	5,76E-02	4,92E-02	3,79E-02	2,03E-09
100	7,70E-02	5,89E-02	5,01E-02	4,34E-02	3,43E-02	2,03E-09
130	6,16E-02	4,75E-02	4,05E-02	3,61E-02	2,95E-02	2,04E-09
160	5,00E-02	3,71E-02	3,37E-02	3,04E-02	2,54E-02	2,04E-09
200	3,96E-02	3,01E-02	2,71E-02	2,47E-02	2,15E-02	2,05E-09

Fonte: Autoria Própria

Figura 38 – Placa 1 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ )

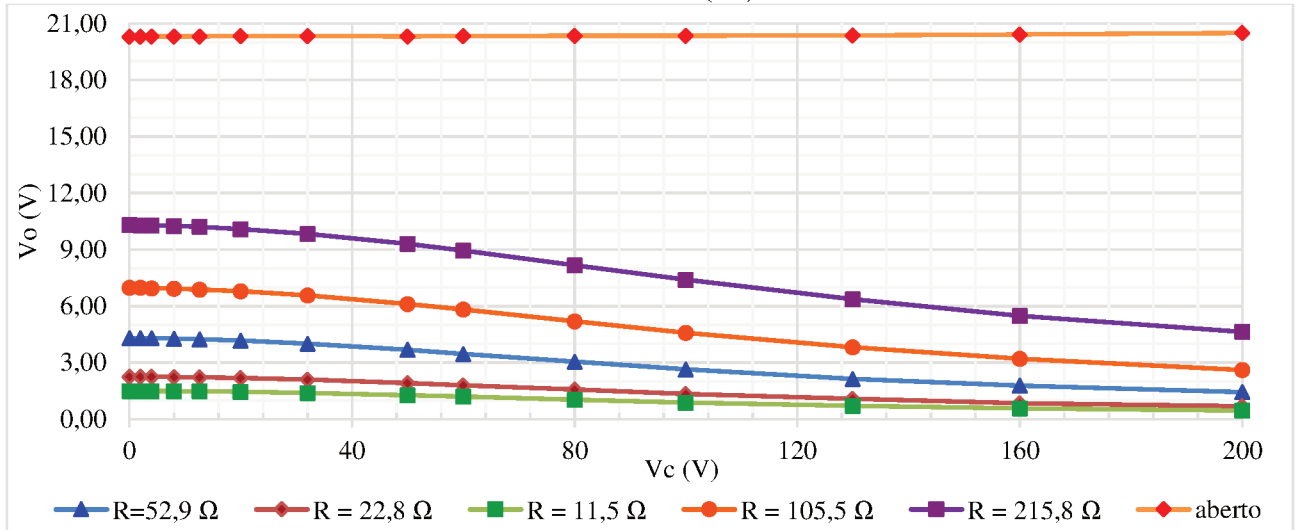
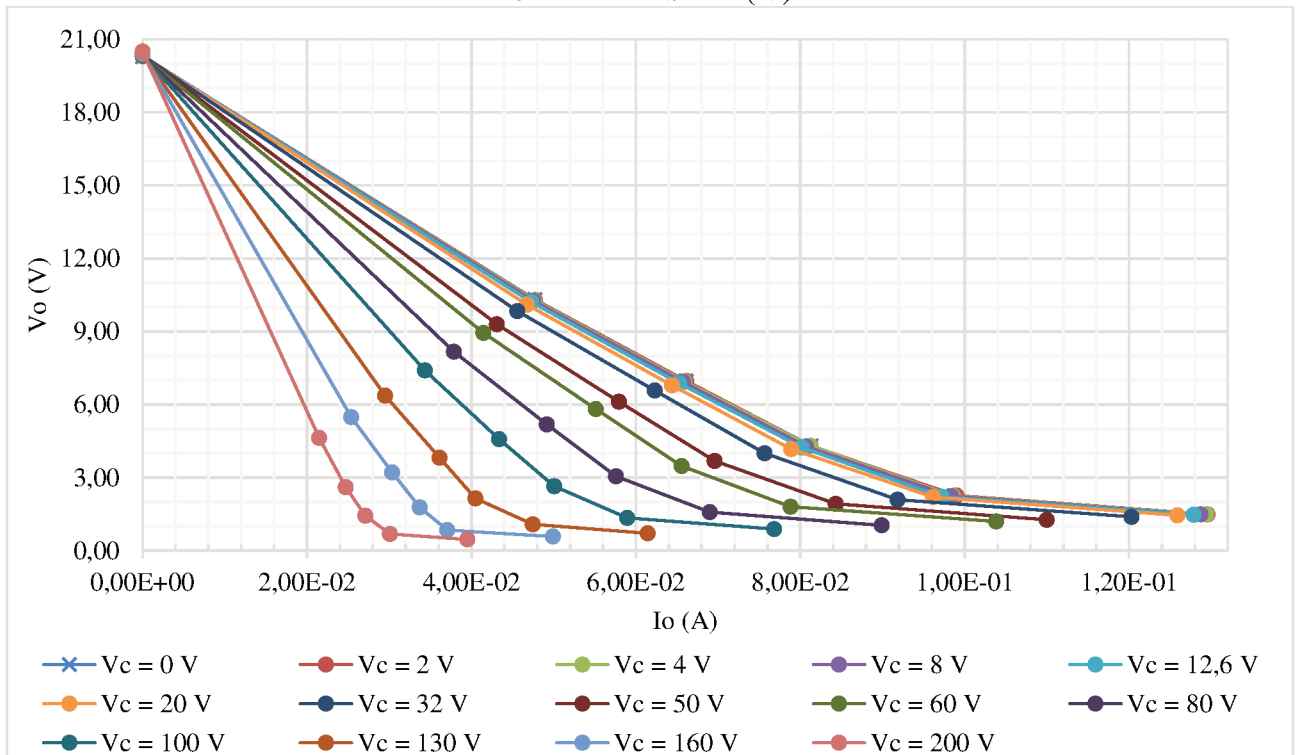


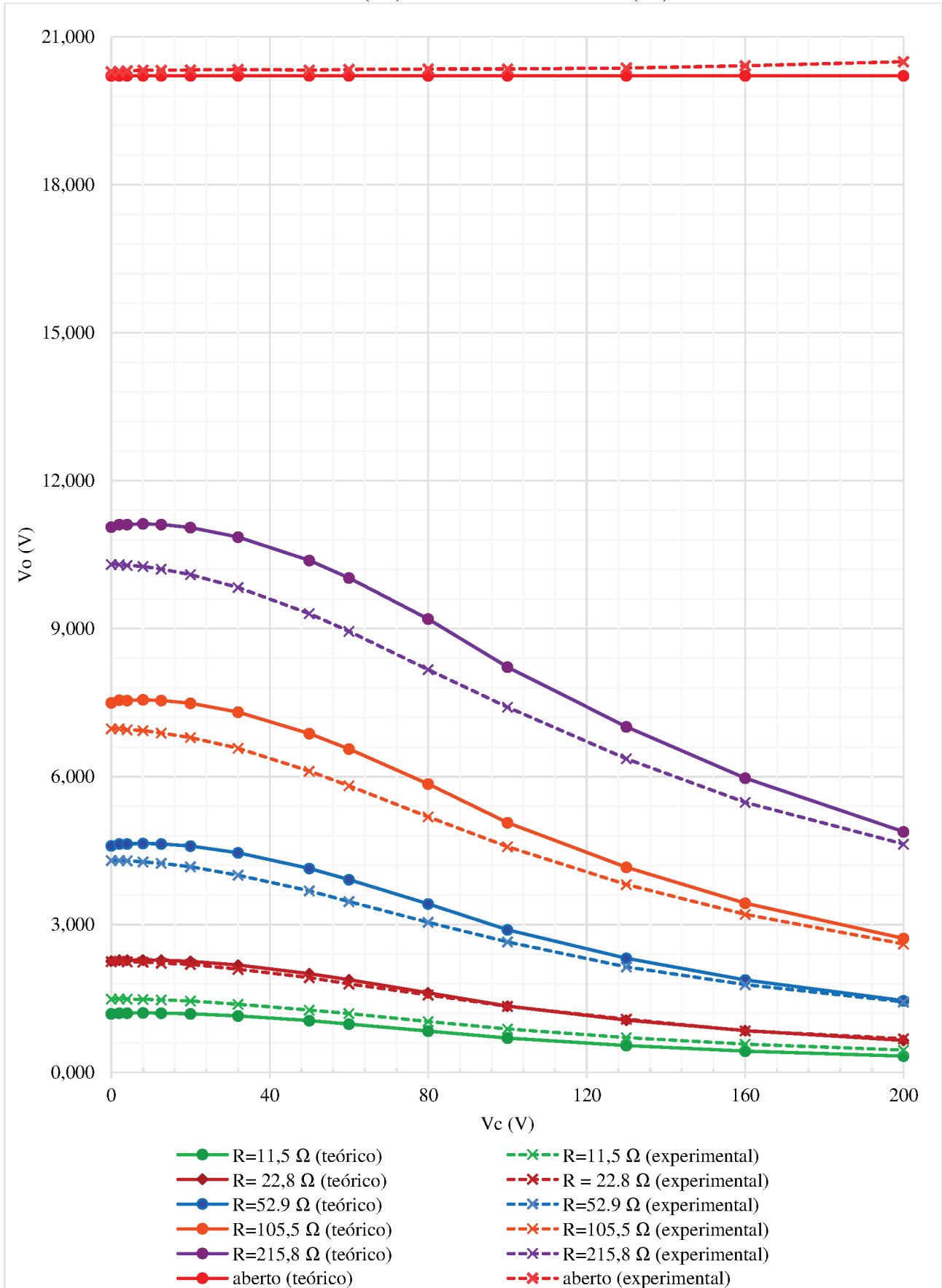
Figura 39 – Placa 1 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ )



#### 6.5.1.1 Comparação dos resultados das tensões teóricas e experimentais

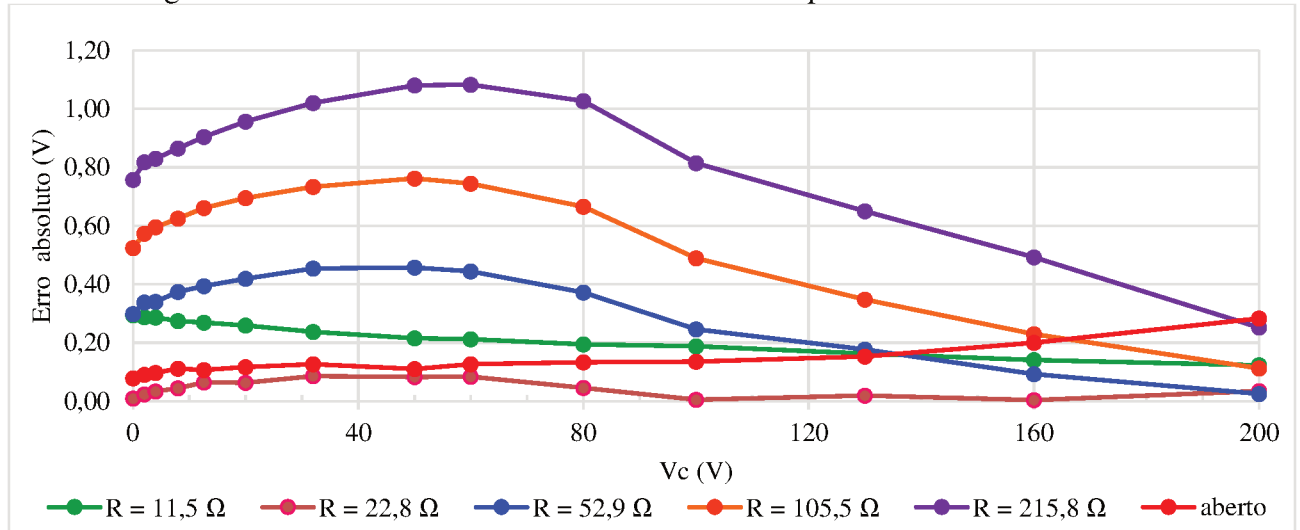
A Figura 40 apresenta os valores médios de tensão de saída experimentais e teóricos versus a tensão de controle. Já a Figura 41 apresenta o gráfico com os valores dos erros absolutos de cada medida. Pode-se perceber que os erros absolutos foram relativamente baixos, todos menores que 1,08 V. Em geral, pode-se afirmar que os resultados experimentais estão de acordo com os resultados teoricamente calculados.

Figura 40 – Placa 1 - Gráfico comparando os valores teóricos com o resultado experimental: Tensão de Saída ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ )



Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Placa 1- Erro absoluto dos resultados experimentais com os teóricos



Fonte: Autoria Própria

### 6.5.2 Placa 2

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais do capacitor variável montado com capacitores *KEMET®/ c1206c106k4rac7800*, cuja tensão nominal é 16 V e capacitância varia de 100,00  $\mu\text{F}$  a 25,25  $\mu\text{F}$ .

Os resultados dos valores médios da tensão de saída estão apresentados na Tabela 14, já os valores médios da corrente de saída na Tabela 15.

A Figura 42 apresenta o gráfico dos resultados experimentais do valor médio da tensão de saída versus a tensão de controle do capacitor variável. A Figura 43 apresenta o gráfico dos resultados experimentais da tensão de saída corrigida versus a corrente de saída.

Tabela 14- Placa 2 -Valor Médio da Tensão de Saída -  $V_o$  - (V)

Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
	11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	aberto
0	4,66	7,37	11,48	14,44	16,17	20,25
3,84	4,47	7,00	10,97	13,95	16,44	20,31
4,16	4,43	6,93	10,84	13,83	16,40	20,32
5,76	4,23	6,61	10,41	13,46	16,22	20,33
6,08	4,19	6,46	10,26	13,31	16,14	20,33
8	3,92	6,06	9,68	12,79	15,83	20,34
9,92	3,63	5,53	9,00	12,17	15,34	20,34
10,24	3,54	5,42	8,81	11,99	15,22	20,34
11,84	3,30	5,02	8,28	11,47	14,83	20,35
12,16	3,22	4,91	8,11	11,28	14,69	20,35
13,76	2,99	4,53	7,61	10,75	14,26	20,35
14,08	2,90	4,41	7,44	10,56	14,09	20,35
16	2,63	4,00	6,88	9,95	13,59	20,35
17,92	2,32	3,57	6,34	9,30	13,09	20,35
18,24	2,25	3,49	6,22	9,15	12,95	20,35
19,84	2,05	3,21	5,81	8,71	12,50	20,35
20,16	1,99	3,13	5,63	8,54	12,36	20,35
21,76	1,82	2,89	5,29	8,17	11,89	20,35
22,08	1,77	2,82	5,21	8,06	11,76	20,36
24	1,60	2,58	4,85	7,64	11,31	20,36
25,92	1,45	2,37	4,53	7,24	10,84	20,36
26,24	1,42	2,32	4,46	7,15	10,70	20,36
27,84	1,32	2,18	4,23	6,86	10,25	20,36
28,16	1,29	2,14	4,18	6,78	10,13	20,36
29,76	1,21	2,02	3,98	6,52	9,81	20,36
30,08	1,19	1,99	3,94	6,45	9,72	20,36
31,68	1,11	1,89	3,75	6,21	9,43	20,36

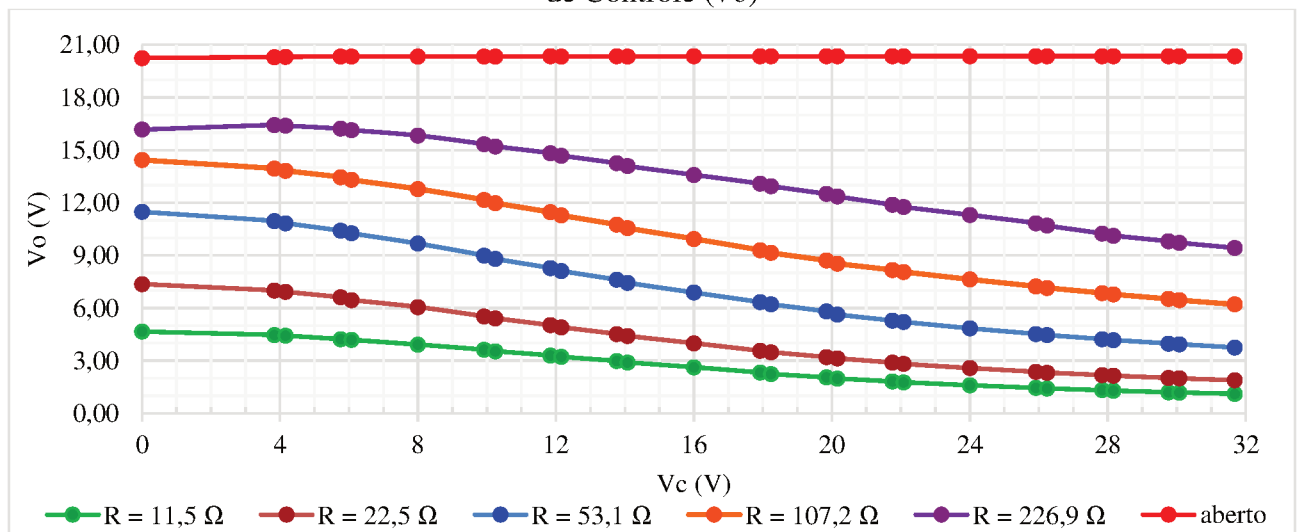
Fonte: Autoria Própria



Tabela 15 - Placa 2 – Valor Médio da Corrente de Saída -  $I_o$  - (A)

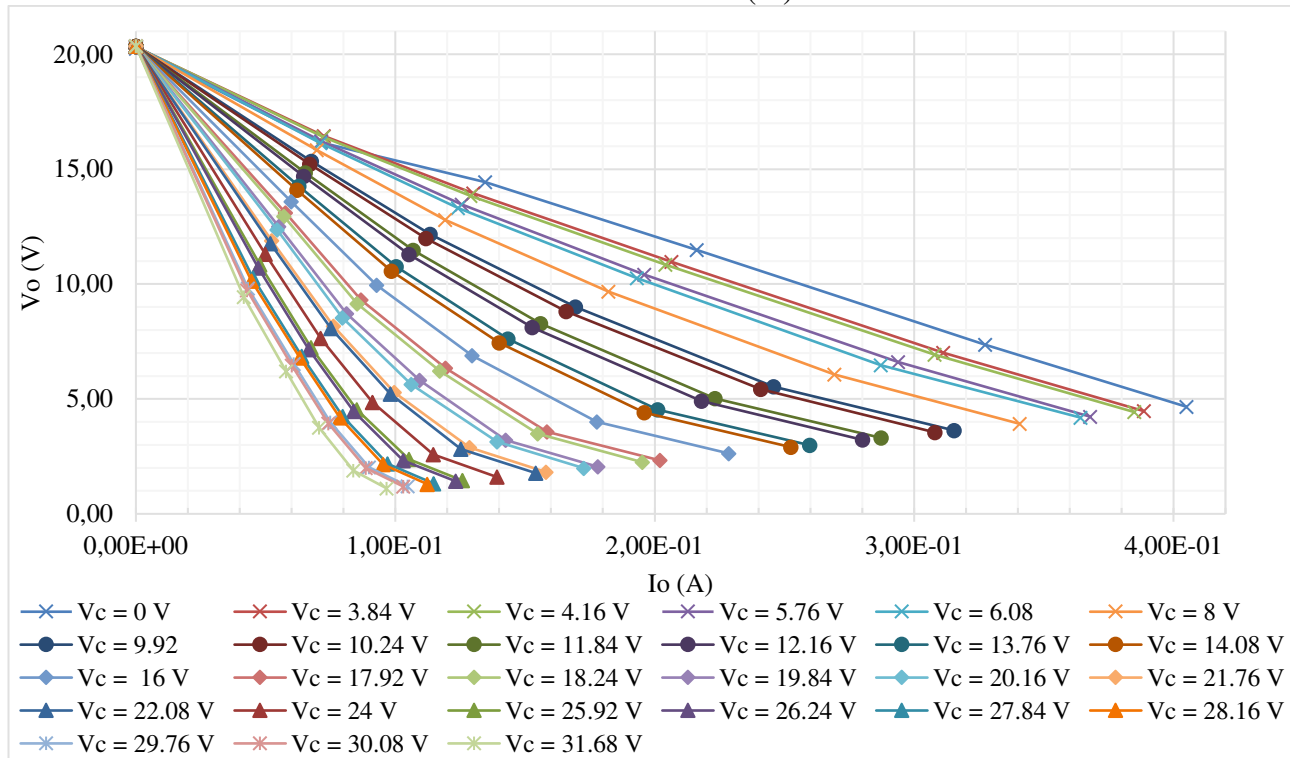
Tensão de controle (V)	Carga ( $\Omega$ )					
	11,50	22,50	51,10	107,20	226,90	10E10
0	4,05E-01	3,27E-01	2,16E-01	1,35E-01	7,13E-02	2,03E-10
3,84	3,89E-01	3,11E-01	2,07E-01	1,30E-01	7,24E-02	2,03E-10
4,16	3,85E-01	3,08E-01	2,04E-01	1,29E-01	7,23E-02	2,03E-10
5,76	3,68E-01	2,94E-01	1,96E-01	1,26E-01	7,15E-02	2,03E-10
6,08	3,64E-01	2,87E-01	1,93E-01	1,24E-01	7,11E-02	2,03E-10
8	3,41E-01	2,69E-01	1,82E-01	1,19E-01	6,98E-02	2,03E-10
9,92	3,15E-01	2,46E-01	1,69E-01	1,13E-01	6,76E-02	2,03E-10
10,24	3,08E-01	2,41E-01	1,66E-01	1,12E-01	6,71E-02	2,03E-10
11,84	2,87E-01	2,23E-01	1,56E-01	1,07E-01	6,54E-02	2,03E-10
12,16	2,80E-01	2,18E-01	1,53E-01	1,05E-01	6,47E-02	2,03E-10
13,76	2,60E-01	2,01E-01	1,43E-01	1,00E-01	6,28E-02	2,03E-10
14,08	2,53E-01	1,96E-01	1,40E-01	9,85E-02	6,21E-02	2,03E-10
16	2,29E-01	1,78E-01	1,30E-01	9,28E-02	5,99E-02	2,03E-10
17,92	2,02E-01	1,58E-01	1,19E-01	8,68E-02	5,77E-02	2,03E-10
18,24	1,95E-01	1,55E-01	1,17E-01	8,53E-02	5,71E-02	2,04E-10
19,84	1,78E-01	1,43E-01	1,09E-01	8,12E-02	5,51E-02	2,03E-10
20,16	1,73E-01	1,39E-01	1,06E-01	7,96E-02	5,45E-02	2,04E-10
21,76	1,58E-01	1,29E-01	9,96E-02	7,62E-02	5,24E-02	2,04E-10
22,08	1,54E-01	1,25E-01	9,81E-02	7,52E-02	5,18E-02	2,04E-10
24	1,39E-01	1,15E-01	9,13E-02	7,12E-02	4,98E-02	2,04E-10
25,92	1,26E-01	1,05E-01	8,52E-02	6,75E-02	4,78E-02	2,04E-10
26,24	1,23E-01	1,03E-01	8,40E-02	6,67E-02	4,71E-02	2,04E-10
27,84	1,15E-01	9,70E-02	7,97E-02	6,40E-02	4,52E-02	2,04E-10
28,16	1,12E-01	9,52E-02	7,87E-02	6,33E-02	4,46E-02	2,04E-10
29,76	1,05E-01	8,98E-02	7,50E-02	6,08E-02	4,32E-02	2,04E-10
30,08	1,03E-01	8,86E-02	7,42E-02	6,02E-02	4,28E-02	2,04E-10
31,68	9,66E-02	8,38E-02	7,07E-02	5,79E-02	4,16E-02	2,04E-10

Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – Placa 2 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ )

Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Placa 2 - Gráfico do resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Corrente de Saída ( $I_o$ )



Fonte: Autoria Própria

#### 6.5.2.1 Comparação dos resultados das tensões teóricas e experimentais

A Figura 44 apresenta os valores médios de tensão de saída experimentais e teóricos versus a tensão de controle. Já a Figura 45 apresenta o gráfico com os valores dos erros absolutos de cada medida. Em geral, pode-se afirmar que os resultados experimentais apresentaram uma pequena divergência. Percebe-se que a capacitância do capacitor variável foi menor que o esperado, reduzindo o valor da tensão de saída.

Uma possível razão para esse fenômeno é a operação muito próxima e em alguns momentos acima da tensão nominal (16 V) dos capacitores utilizados na Placa 2.

Quando se aumenta a tensão de controle, aumenta-se a tensão em cima de cada braço do capacitor variável. Assim, ao variar a tensão de controle até 32 V, o valor médio da tensão em cada braço será de 16 V, no entanto em metade do período o valor instantâneo da tensão passará do valor nominal de 16 V, já que a tensão da fonte de entrada é de 21,21 V de pico (15 Vrms).

Segundo TAIYO YUDEN, os capacitores cerâmicos normalmente suportam tensões até 3 vezes o valor nominal apresentado nos dados dos fabricantes. Entretanto, ao se trabalhar acima dos valores nominais pode-se perder a confiabilidade dos capacitores.

Além disso, de acordo com AVX (2015, pg.96), normalmente, a tensão alternada aumenta a capacitância dos capacitores cerâmicos. Porém, se essa tensão aplicada neles for muito alta, haverá a redução da capacitância.

Assim, na Placa 2 o valor de 21,21 V (pico) da fonte de entrada pode ter sido um valor muito alto de tensão alternada para esse capacitor, o que poderia ter causado essa queda nos valores das capacitâncias.

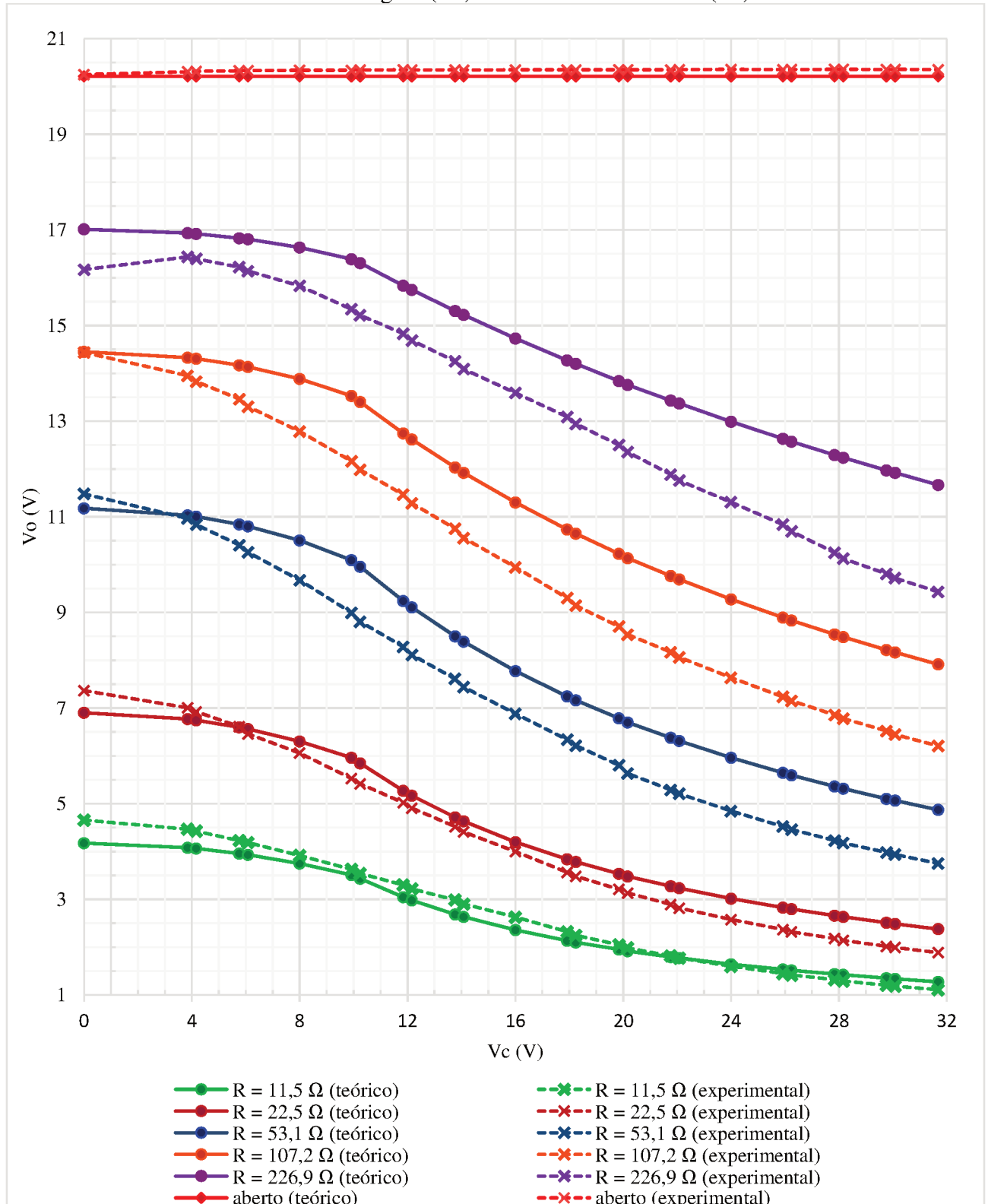
Na Placa 1, esses problemas podem não ter acontecido pelo o fato de os capacitores terem tensão nominal de 100 V e o valor da fonte de entrada ser de 21,21 V (pico), ou seja, um valor muito menor que o valor nominal.

Uma outra possível razão para essa divergência dos valores teóricos e experimentais poderia ser que os capacitores utilizados na montagem da Placa 2 não seguiam os valores de capacitância por

tensão apresentados na folha de dados do fabricante, como foi considerado para os cálculos dos valores teóricos da tensão na carga.

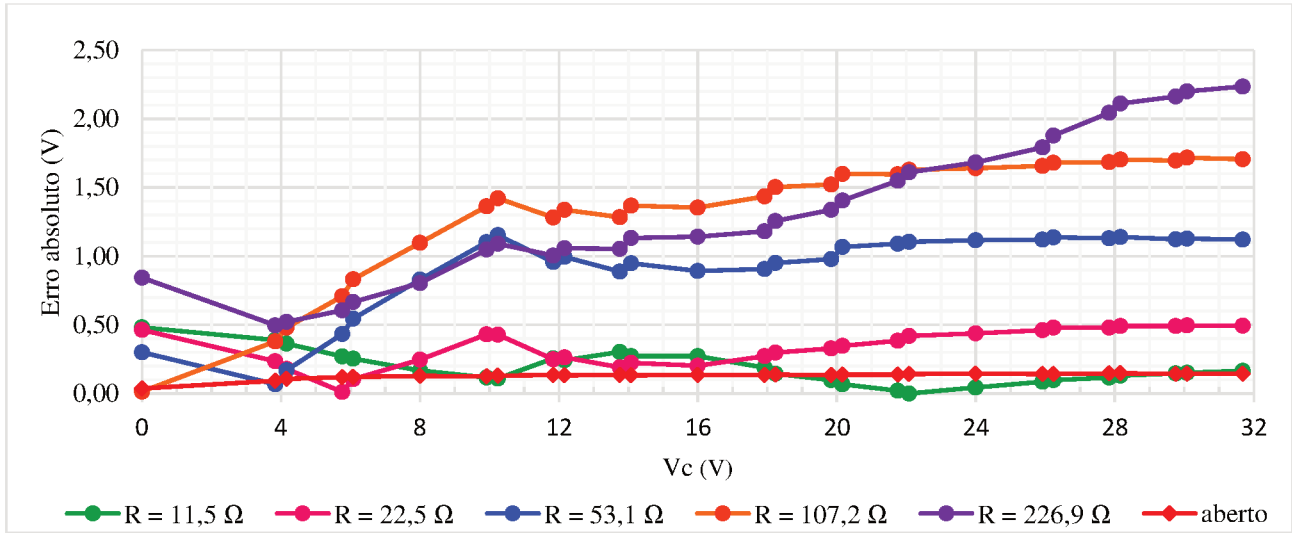
Como não foi feita a verificação do comportamento da capacitância equivalente da Placa 2 nem pelo conversor *Buck* nem pelo analisador de impedâncias, não se pode afirmar que os capacitores utilizados seguem a curva de capacitância por tensão apresentada pelo fabricante, o que mostra a importância dessa verificação como proposto nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

Figura 44 - Placa 2 - Gráfico comparando os valores teóricos com o resultado experimental: Tensão de Saída Corrigida ( $V_o$ ) vs. Tensão de Controle ( $V_c$ )



Fonte: Autoria Própria

Figura 45 – Placa 2- Erro absoluto dos resultados experimentais com os teóricos



Fonte: Autoria Própria

## 7 CONCLUSÃO

Ao longo deste documento foi apresentado um estudo a respeito de capacitores cerâmicos classe II. A seção 2 mostrou que os capacitores cerâmicos classe II apresentam uma característica que é a dependência da capacitância com a tensão, uma característica que normalmente é vista como deletéria desses capacitores. Porém este trabalho de conclusão de curso estudou e aproveitou desse fato para o desenvolvimento de um retificador com tensão de saída variável.

Primeiramente, foi preciso verificar tal característica medindo a capacitância enquanto se aumentava a tensão. Para isso foi proposto (seção 3) e validado (seção 4) um método para determinar a capacitância de capacitores utilizando medições de tensão e corrente do capacitor do filtro de entrada do conversor *Buck*.

Na seção 4 pode-se validar a curva de capacitância versus tensão apresentada na folha de dados de um dos modelos de capacitores cerâmicos classe II utilizados neste documento (*CGA9N2X7R2A475K230KA/TDK*<sup>®</sup>).

Na seção 5 apresentou-se o circuito do capacitor variável controlável proposto por Katsuki, Shirouzu, Hadara e Fujiwara (1993). Foram construídas duas placas utilizando dois modelos diferentes de capacitores cerâmicos classe II. No entanto, só foi possível verificar e validar o funcionamento de uma (Placa 1), onde se concluiu experimentalmente (até 100 V na tensão de controle  $V_c$ ) que a capacitância equivalente do circuito segue os valores de capacitância versus tensão informado pelo fabricante.

Na seção 6 foi proposto um retificador com tensão de saída variável utilizando o circuito do capacitor variável controlável proposto na seção 5. O retificador foi construído e funcionou dentro do esperado quando os ensaios foram realizados com a Placa 1 (item 6.5.1), e com um pequeno erro quando os ensaios foram com a Placa 2 (item 6.5.2).

Em geral, pode-se concluir que é possível utilizar os capacitores cerâmicos classe II para se construir um circuito com capacitância variável controlável e aplicá-lo em um retificador de onda completa com capacitor em série, a fim de obter uma fonte de tensão variável.

## TRABALHOS FUTUROS

Para complemento e melhor entendimento do tema em estudo propõe-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar a medição da capacitância dos capacitores variáveis apresentados em 5.1.1 (Placa 1 e Placa 2) com o conversor *Buck*, e verificar a curva capacitância versus tensão obtida com a curva apresentada pelo fabricante.

- Realizar a medição da capacitância dos capacitores variáveis apresentados em 5.1.1 (Placa 1 e Placa 2) com o analisador de impedância, e verificar a curva capacitância versus tensão obtida com a curva apresentada pelo fabricante.

- Realizar ensaios no retificador com tensão de saída variável (seção 6) com os capacitores variáveis apresentados em 5.1.1 (Placa 1 e Placa 2) com a fonte de entrada com diferentes valores de frequências. E verificar se os resultados experimentais vão de acordo com os resultados das equações do item 6.2.

- Realizar ensaios no retificador com tensão de saída variável (seção 6) com o capacitor variável apresentados em 5.1.1 Placa 1 com a fonte de entrada com diferentes valores de tensão. E verificar se os resultados experimentais vão de acordo com os resultados das equações do item 6.2.

Alguns desses trabalhos teriam sido realizados normalmente se não fosse os problemas gerados pela pandemia mundial covid-19, o que acarretou o fechamento dos laboratórios de pesquisa da universidade.

## REFERÊNCIAS

- [1] SARJEANT, W. J.; ZIRNHELD, J.; MACDOUGALL, F. W.. Capacitors. **IEEE Transactions on Plasma Science**, vol. 26, no. 5, pp. 1368-1392, Oct. 1998, doi: 10.1109/27.736020.
- [2] Callister, Jr., William D.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. ISBN 978-85-216-1595-8.
- [3] KEMET CORPORATION. **Introduction to Capacitor Technologies: What is a Capacitor?**. Technical Guide, 2013. Disponível em: <https://sh.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/6/What%20is%20a%20Capacitor.pdf>. Acesso em: 07/07/2020.
- [4] PAN, M.; RANDALL, C.A. A brief introduction to ceramic capacitors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 26, no. 3, pp. 44-50, May-June 2010, doi: 10.1109/MEI.2010.5482787.
- [5] PANASONIC, Automotive & Industrial Systems Company; **Aluminum Electrolytic Capacitors**, Technical Guide, 2016. Disponível em: [https://www.tti-europe.com/content/dam/tti-europe/manufacturers/panasonic/resources/Technical\\_Guide.pdf](https://www.tti-europe.com/content/dam/tti-europe/manufacturers/panasonic/resources/Technical_Guide.pdf). Acesso em: 07/07/2020
- [6] MUSSOI, Fernando Luiz R.; VILLAÇA, Marco V. M.. **Capacitores**. 3.ed. Florianópolis. 2000. 38 apostila. Disponível em: <http://www.inf.unioeste.br/~reginaldo/informatica/capacitor/capacitor1.pdf>. Acesso em: 07/07/2020.
- [7] MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. 3. ed. rev. Florianópolis: Ed. do Autor, 2008. vii, 380 p. ISBN 8590520323.
- [8] MARTINS, Denizar Cruz. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos isolados**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2018. 422 p. ISBN 978859052037.
- [9] MCLYMAN, Colonel Wm. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 4.ed. United States of America: Taylor and Francis Group, 2011. 669p.
- [10] MELO, Jade Oumura; NETTO, Luiz Henrique. EEL7200: Relatório final: Conversor Forward. Florianópolis: Ed. do Autor, 2019. 23 p.
- [11] KATSUKI, A.; SHIROUZU, K.; HARADA, K.; FUJIWARA, M. Improved variable capacitance device and its applications to resonant converters. **Proceedings of Intelec 93: 15th International Telecommunications Energy Conference**, Paris, France, 1993, pp. 242-246 vol.2, doi: 10.1109/INTLEC.1993.388566.
- [12] SOKAL, N. O.; SUM, K. Sum; HAMILL, D. C.. A capacitor-fed, voltage-step-down, single-phase, nonisolated rectifier, **APEC '98: Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition**, Anaheim, CA, USA, 1998, pp. 208-215 vol.1, doi: 10.1109/APEC.1998.647693.
- [13] AVX CORPORATION, **Advanced Ceramic Capacitors**. Technical Guide. 2015. Disponível em: <http://catalogs.avx.com/AdvancedCeramicCapacitors.pdf>. Acesso em: 27/08/2020.
- [14] TAIYO YUDEN CORPORATION, **Is it OK to use ceramic capacitors over the rated voltage?**. Disponível em: <https://www.yuden.co.jp/eu/product/support/faq/q016.html>. Acesso em: 27/08/2020.

[15] KEMET CORPORATION, **Measure Capacitance of Class-II and Class-III Ceramic Capacitors**. 2014. Disponível em: <https://sh.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/198/2014-03%20Measure%20Capacitance%20of%20Class-II%20and%20Class-III%20Ceramic%20Capacitors.pdf>. Acesso em:17/11/2020.



## APÊNDICE A – Dados técnicos dos capacitores utilizados

### A.1 CAPACITOR CERÂMICO *CGA9N2X7R2A475K230KA*

No Quadro 1 foi listado as principais características do capacitor *CGA9N2X7R2A475K230KA* da *TDK Corporation*®.

Quadro 1 – Dados técnicos do capacitor *CGA9N2X7R2A475K230KA*

Fabricante	TDK Corporation
Nome de série	CGA
Dimensões L x W x H (mm)	5,70 x 5,00 x 2,30
Intervalo térmico de operação (°C)	-55/+125
Terminal (mm)	0,20
Tensão Nominal CC (V)	100
Capacitância Máxima (µF)	4,7
Tolerância	+/- 10%

Fonte: [https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part\\_no=CGA9N2X7R2A475K230KA](https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part_no=CGA9N2X7R2A475K230KA)

A Figura 46 mostra o comportamento da capacitância com o aumento da tensão. Por ser um capacitor cerâmico classe II, percebe-se que a capacitância diminui com o aumento da tensão. O fabricante disponibilizou dez pontos deste gráfico, que são apresentados na Tabela 16.

Figura 46 - Capacitância em função da tensão CC



Fonte: [https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part\\_no=CGA9N2X7R2A475K230KA](https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part_no=CGA9N2X7R2A475K230KA)

Tabela 16 – Capacitância em função da tensão DC do capacitor *CGA9N2X7R2A475K230KA*

Tensão (V)	Capacitância (µF)
0	4,700
10	4,690
16	4,512
25	4,106
30	3,825
40	3,242
50	2,660
65	2,060
80	1,625
100	1,234

Fonte: [https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part\\_no=CGA9N2X7R2A475K230KA](https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part_no=CGA9N2X7R2A475K230KA)

## A.2 CAPACITOR CERÂMICO C1206C106K4RAC7800

No Quadro 2 foi listado as principais características do capacitor C1206C106K4RAC7800 da Kemet®.

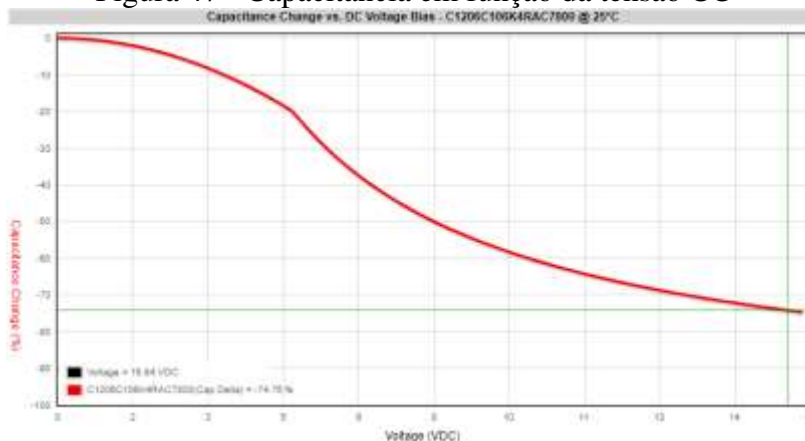
Quadro 2 – Dados técnicos do capacitor C1206C106K4RAC7800

Fabricante	Kemet
Nome de série	SMD Comm X7R
Dimensões L x W x H (mm)	3,20 x 1,60 x 1,60
Intervalo térmico de operação (°C)	-55/+125
Terminal (mm)	0,20
Tensão Nominal CC (V)	16
Capacitância Máxima (µF)	10,0
Tolerância	+/- 10%

Fonte: <http://ksim.kemet.com/Plots/SpicePlots.aspx>

Figura 46A Figura 47 mostra o comportamento da capacitância com o aumento da tensão. Por ser um capacitor cerâmico classe II, percebe-se que a capacitância diminui com o aumento da tensão. O fabricante disponibilizou vinte e sete pontos deste gráfico, que são apresentados na Tabela 17.

Figura 47 - Capacitância em função da tensão CC



Fonte: <http://ksim.kemet.com/Plots/SpicePlots.aspx>

Tabela 17 – Capacitância em função da tensão DC do capacitor *C1206C106K4RAC7800*

<b>DC Voltage Bias</b>	<b>Capacitance Change (%)</b>	<b>Capacitance (<math>\mu</math>F)</b>
0	0	10
1,92	0,0295	9,705
2,08	0,0346	9,654
2,88	0,0664	9,336
3,04	0,0739	9,261
4	0,128	8,72
4,96	0,1968	8,032
5,12	0,2188	7,812
5,92	0,3243	6,757
6,08	0,3421	6,579
6,88	0,4186	5,814
7,04	0,4318	5,682
8	0,5	5
8,96	0,5536	4,464
9,12	0,5614	4,386
9,92	0,5968	4,032
10,08	0,6043	3,957
10,88	0,6324	3,676
11,04	0,6377	3,623
12	0,6667	3,333
12,96	0,6914	3,086
13,12	0,6951	3,049
13,92	0,7126	2,874
14,08	0,7159	2,841
14,88	0,7312	2,688
15,04	0,734	2,66
15,84	0,7475	2,525

Fonte: <http://ksim.kemet.com/Plots/SpicePlots.aspx>

## APÊNDICE B – Projeto do Protótipo 1 (*Forward*)

O primeiro protótipo construído foi um conversor *Forward*. A primeira versão desse conversor foi feita em conjunto com o docente da graduação Luiz H. Netto como projeto da matéria EEL7200 (MELO; NETTO, 2019).

O conversor *Forward* utilizado neste TCC foi feito utilizando e adaptando algumas peças e a placa dessa primeira versão do conversor. Essa nova versão tem as seguintes especificações:

- Potência ( $P$ ): 100 W;
- Tensão de entrada ( $V_i$ ): 100 V;
- Valor médio da corrente da fonte de entrada ( $I_i$ ): 1 A;
- Variação máxima da corrente no indutor de saída ( $\Delta I_{Lo}$ ): 20 %;
- Variação máxima da tensão na saída ( $\Delta V_o$ ): 5 %;
- Frequência de chaveamento ( $f_s$ ): 47,50 kHz;
- Resistência de carga ( $R_o$ ): 24,2  $\Omega$ ;
- Relação de espiras entre o primário e o secundário do transformador ( $n$ ): 0,5.

O projeto desse protótipo foi feito conforme descrito por Martins (2018).

### B.1 CÁLCULO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO CIRCUITO

Com o auxílio do software *MathCad*<sup>®</sup> calculou-se os principais parâmetros do protótipo Conversor *Forward*.

$$\text{Razão Cíclica (D):} \quad D = \frac{V_o \cdot n}{V_i} = 0,246 \quad (20)$$

$$\text{Tensão de Saída (V}_o\text{):} \quad V_o = \sqrt{P_o \cdot R_o} = 49,1935\text{V} \quad (21)$$

$$\text{Valor médio da corrente na carga (I}_o\text{):} \quad I_o = \frac{P_o}{V_o} = 2,033\text{A} \quad (22)$$

$$\text{Indutância do indutor de saída (L}_o\text{):} \quad L_o = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{\Delta I_{Lo}} = 1,921\text{ mH} \quad (23)$$

$$\text{Capacitância do capacitor de saída (C}_o\text{):} \quad C_o = \frac{\Delta I_{Lo}}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_o} = 2,547\text{ mH} \quad (24)$$

$$\text{Valor máximo da corrente no indutor de saída (I}_{Lom\acute{a}x}\text{):} \quad I_{Lom\acute{a}x} = \frac{V_o}{R_o} + \frac{\Delta I_{Lo}}{2} = 2,236\text{A} \quad (25)$$

$$\text{Valor médio da corrente no indutor de saída (I}_{Lomed}\text{):} \quad I_{Lomed} = I_o = 2,033\text{A} \quad (26)$$

$$\text{Valor eficaz da corrente no indutor de saída (I}_{Lorms}\text{):} \quad I_{Lorms} = I_{Lomed} = 2,033\text{A} \quad (27)$$

$$\text{Valor eficaz da corrente no primário do transformador (I}_{primms}\text{) (simulação):} \quad I_{primms} = 2,4337\text{ A} \quad (28)$$

Valor eficaz da corrente no secundário do transformador ( $I_{secrms}$ ):

$$I_{secrms} = \frac{I_{Lorms}}{\sqrt{3}} = 1,174 A \quad (29)$$

Valor eficaz da corrente no terciário do transformador ( $I_{terrms}$ ):

$$I_{terrms} = 10\% \cdot I_{prirms} = 0,243 A \quad (30)$$

## B.2 PROJETO DO INDUTOR DE SAÍDA $L_o$

O núcleo de *Ferrite* escolhido para a montagem do indutor foi o *E42/15*. Esse núcleo apresenta a área da seção central do núcleo ( $A_e$ ) igual a  $1,81 \text{ cm}^2$  e a área da janela do carretel ( $A_w$ ) igual a  $1,57 \text{ cm}^2$ .

Para validar a escolha do núcleo é preciso saber se o produto  $A_e A_w$  calculado é menor que  $2,84 \text{ cm}^4$ . Para isso supõe-se que a densidade de corrente seja no máximo ( $J_{max}$ )  $450 \text{ A/cm}^2$ , o fator de utilização ( $k_w$ ) seja de  $0,7$  e a máxima densidade de campo magnética ( $B_{max}$ ) igual a  $0,3 \text{ T}$ .

Substituindo as variáveis em (31), o produto  $A_e A_w$  será:

$$A_e \cdot A_w = \frac{I_{Lomed} \cdot I_{Lomax} \cdot L_o}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_w} = 0,924 \text{ cm}^4 \quad (31).$$

O número de espiras enroladas envolta do núcleo do indutor ( $N_{L_o}$ ) é dado por (32). O indutor foi construído com 80 espiras.

$$N_{L_o} = \frac{L_o \cdot I_{Lomax}}{B_{max} \cdot A_e} = 79,098 \quad (32)$$

O entreferro, espaço entre os núcleos de *ferrites*, é calculado em (33). Ele foi feito utilizando papel *sulfite*. A permeabilidade magnética do ar no vácuo ( $\mu_0$ ) é de  $4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$ .

$$\text{Entreferro} = \frac{N_{L_o}^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e}{L_o} = 0,758 \text{ mm} \quad (33)$$

A área de cobre ( $S_{L_o}$ ) calculado em (34) é o valor mínimo de área de cobre necessário para condução da corrente no indutor dentro da densidade máxima desejada.

$$S_{L_o} = \frac{I_{Lomed}}{J_{max}} = 0,452 \text{ mm}^2 \quad (34)$$

A escolha dos fios utilizados deve ser feita considerando o efeito *skin*, que é a tendência de a corrente alternada percorrer na borda do condutor. Assim, para haver melhor utilização da área de cobre do condutor, se calcula que o diâmetro máximo que o condutor possa ter (35).

$$\text{Diâmetro}_{máximo} = \frac{2 \cdot 7,5}{\sqrt{f_s}} = 0,069 \text{ cm} \quad (35)$$

Então, utilizou-se 2 fios *AWG23* em paralelo da construção desse indutor.

Para ver a possibilidade de execução do projeto do indutor é necessário calcular a menor janela  $A_{Wmin}$  que os condutores irão ocupar, essa por sua vez precisa ser menor que o valor da janela do núcleo utilizado. Em (36) concluiu-se que o projeto é executável.

$$A_{Wmin} = \frac{N_{Lo} \cdot n_{condutores} \cdot S_{AWG23}}{k_W} = 0,736 \text{ cm}^2 \quad (36)$$

onde  $n_{condutores}$  é o número total de condutores, nesse caso 2.

A perda no cobre ( $P_{Locobre}$ ) é a perda relacionada a resistência do enrolamento ( $R_{Locobre}$ ) calculada em (37), onde:  $\rho_{AWG23}$  é a resistividade de um fio AWG23 por cm (0.067  $\Omega/cm$ ) e  $l_{espira}$  é o comprimento médio de uma espira do núcleo usado (9,7 cm).

$$R_{Locobre} = \frac{\rho_{AWG23} \cdot l_{espira} \cdot N_{Lo}}{n_{condutores}} = 0,295 \Omega \quad (37)$$

A perda no cobre é calculada em (38), onde o valor eficaz da corrente no indutor foi aproximado pelo valor médio dela.

$$P_{Locobre} = R_{Locobre} \cdot I_{Lrms}^2 = 1,221 \text{ W} \quad (38)$$

A perda magnética no núcleo é dada em (39), onde:  $K_h$  é  $4 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_f$  é  $4 \cdot 10^{-10}$  e  $V_{E4215}$  é o volume do núcleo E4215 (17,10  $cm^3$ ).

$$P_{Lonúcleo} = \left( \frac{B_{max} \cdot \Delta I_{Lomax}}{I_{Lomax}} \right)^{2,4} \cdot (K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2) \cdot V_{E4215} = 4,454 \cdot 10^{-8} \text{ W} \quad (39)$$

O núcleo irá sofrer uma elevação na temperatura ( $\Delta T$ ) de 19,081  $^\circ C$  (41). Para o cálculo da elevação da temperatura é necessário primeiramente calcular a resistência térmica do núcleo, apresentado em (40).

$$R_{t_{E4215}} = 23 \cdot (A_e \cdot A_W)^{-0,37} = 15,628 \frac{^\circ C}{W} \quad (40)$$

$$\Delta T = (P_{Locobre} + P_{Lonúcleo}) \cdot R_{t_{E4215}} = 19,081^\circ C \quad (41)$$

O transformador construído na prática apresentou uma indutância aproximadamente de 2,13 mH.

### B.3 PROJETO DO TRANSFORMADOR

O núcleo escolhido para a montagem do transformador foi o *E30/14*. Esse núcleo apresenta a área da seção central do núcleo ( $A_e$ ) igual a 1,2  $cm^2$  e a área da janela do carretel ( $A_w$ ) igual a 0,85  $cm^2$ .

Para validar a escolha do núcleo é preciso saber se o produto  $A_e A_w$  calculado é menor que 1,02  $cm^4$ . Para isso supõe-se que a densidade de corrente seja no máximo ( $J_{máx}$ ) 450  $A/cm^2$ , o fator de utilização ( $k_w$ ) seja de 0,7, o fator de utilização do primário ( $k_p$ ) seja de 0,5 e a máxima densidade de campo magnética ( $B_{máx}$ ) igual a 0,3 T. Substituindo as variáveis em (42), o produto  $A_e A_w$  será:

$$A_e \cdot A_w = \frac{V_i \cdot I_{primax} \cdot D}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_p \cdot k_w} = 0,49 \text{ cm}^4 \quad (42).$$

O número de espiras relativas ao primário do transformador ( $N_{pri}$ ) é dado por (43), assim foram consideradas um total de 15 espiras.

$$N_{pri} = \frac{V_i \cdot D}{B_{max} \cdot A_e \cdot f_s} = 14,384 \quad (43)$$

O número de espiras do secundário e terciário são iguais e por definição são duas vezes maior que o número de espiras no primário. Assim, foram 30 espiras no secundário ( $N_{sec}$ ) e 30 espiras no terciário do transformador ( $N_{ter}$ ).

A área de cobre do primário ( $S_{pri}$ ), secundário ( $S_{sec}$ ) e terciário ( $S_{ter}$ ) foram calculados respectivamente em (44), (45) e (46).

Sabendo que o condutor pode ter no máximo um diâmetro igual a 0,069 cm (por conta do efeito *skin*) utilizou-se: 2 fios AWG 22 em paralelo no primário, 1 fio AWG 22 no secundário e 1 fio AWG 29 no terciário.

$$S_{pri} = \frac{I_{pri\,rms}}{J_{max}} = 0,541 \text{ mm}^2 \quad (44)$$

$$S_{sec} = \frac{I_{sec\,rms}}{J_{max}} = 0,261 \text{ mm}^2 \quad (45)$$

$$S_{ter} = \frac{I_{ter\,rms}}{J_{max}} = 0,054 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

Para ver a possibilidade de execução do projeto do indutor é necessário calcular a menor janela  $A_{Wmin}$  que os condutores irão ocupar, essa por sua vez precisa ser menor que o valor da janela do núcleo utilizado. Em (47) concluiu-se que o projeto é executável.

$$A_{Wmin} = \frac{N_{pri} \cdot n_{cond_{pri}} \cdot S_{AWG22} + N_{sec} \cdot n_{cond_{sec}} \cdot S_{AWG22} + N_{ter} \cdot n_{cond_{ter}} \cdot S_{AWG29}}{k_W} \quad (47)$$

$$= 0,363 \text{ cm}^2$$

A perda no cobre é a perda relacionada a resistência do enrolamento. Foram calculadas a resistência de enrolamento para o primário ( $R_{cobre\_pri}$ )(48), secundário ( $R_{cobre\_sec}$ )(49) e terciário ( $R_{cobre\_ter}$ )(50). Onde:  $\rho_{AWG22}$  é a resistividade de um fio AWG22 por cm (0.043  $\Omega$ /cm),  $\rho_{AWG29}$  é a resistividade de um fio AWG29 por cm (0.197  $\Omega$ /cm) e  $l_{espira}$  é o comprimento médio de uma espira do núcleo usado (6,7 cm).

$$R_{cobre\_pri} = \frac{\rho_{AWG22} \cdot l_{espira} \cdot N_{pri}}{n_{cond_{pri}}} = 0,022 \text{ } \Omega \quad (48)$$

$$R_{cobre\_sec} = \frac{\rho_{AWG22} \cdot l_{espira} \cdot N_{sec}}{n_{cond_{sec}}} = 0,086 \text{ } \Omega \quad (49)$$

$$R_{cobre\_ter} = \frac{\rho_{AWG29} \cdot l_{espira} \cdot N_{ter}}{n_{cond_{ter}}} = 0,198 \text{ } \Omega \quad (50)$$

As perdas no cobre são calculadas para os três enrolamentos: primário ( $P_{cobre\_pri}$ )(51), secundário ( $P_{cobre\_sec}$ )(52) e terciário ( $P_{cobre\_ter}$ )(53).

$$P_{cobre\_pri} = R_{cobre\_pri} \cdot I_{pri\,rms}^2 = 0,128 \text{ W} \quad (51)$$

$$P_{cobre\_sec} = R_{cobre\_sec} \cdot I_{sec\,rms}^2 = 0,119 \text{ W} \quad (52)$$

$$P_{cobre\_ter} = R_{cobre\_ter} \cdot I_{ter\,rms}^2 = 0,012 \text{ W} \quad (53)$$

A perda magnética no núcleo é dada em (54), onde:  $K_h$  é  $4 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_f$  é  $4 \cdot 10^{-10}$  e  $V_{E3014}$  é o volume do núcleo E3014 ( $8 \text{ cm}^3$ ).

$$P_{Tnúcleo} = \left( \frac{B_{max} \cdot \Delta I_{Lomax}}{I_{Lomax}} \right)^{2,4} \cdot (K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2) \cdot V_{E3014} = 6,58 \cdot 10^{-6} \text{ W} \quad (54)$$

O núcleo irá sofrer uma elevação na temperatura ( $\Delta T$ ) de  $5,89 \text{ }^\circ\text{C}$  (56). Para o cálculo da elevação da temperatura é necessário primeiramente calcular a resistência térmica do núcleo, apresentado em (55).

$$R_{t\_E3014} = 23 \cdot (A_e \cdot A_w)^{-0,37} = 22,832 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (55)$$

$$\Delta T = (P_{cobre\_pri} + P_{cobre\_sec} + P_{cobre\_ter} + P_{Tnúcleo}) \cdot R_{t\_E3014} = 5,89^\circ\text{C} \quad (56)$$

#### B.4 CAPACITOR DE SAÍDA $C_o$

Para dimensionar o capacitor, é necessário que o componente escolhido suporte uma tensão contínua maior que  $49,19 \text{ V}$ , atenda uma corrente eficaz maior que  $100 \text{ mA}$  na frequência de  $47,5 \text{ kHz}$  e tenha uma capacitância mínima de  $2,547 \text{ } \mu\text{F}$  (24). Por isso, escolheu-se utilizar um capacitor da EPCOS® de  $22 \text{ } \mu\text{F}/160 \text{ V}$ .

Para a escolha, foi analisado o valor da corrente corrigida para  $120 \text{ Hz}$ . O fabricante fornece uma constante que relaciona a corrente de  $120 \text{ Hz}$  com outras frequências. Na folha de dados do fabricante, tal constante para uma frequência de  $47,5 \text{ kHz}$  é de  $1,4$ . A corrente corrigida foi de  $73 \text{ mA}$ . Pelos os dados do fabricante um capacitor já seria o suficiente para suprir essa corrente.

A potência ativa consumida pelos capacitores está relacionada a resistência série equivalente do capacitor (ESR). Para calculá-la é necessário saber o fator de dissipação ( $\tan\delta$ ) do capacitor usado, nesse caso, será  $0,2$ . Em (57) tem-se o cálculo do ESR, e em (58) o calcula da potência ativa consumida considerando o valor eficaz da corrente de  $100 \text{ mA}$ .

$$ESR = \frac{\tan\delta}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_o} = \frac{0,2}{2 \cdot \pi \cdot 47500\text{Hz} \cdot 22\mu\text{F}} = 0,03\Omega \quad (57)$$

$$P_{C_o} = ESR \cdot I_{C_o\,rms}^2 = 0,305 \text{ mW} \quad (58)$$

#### B.5 CHAVE $S_I$

A chave escolhida foi a *FCP099N65S3* da *ON Semiconductor*®. Com dissipador *HS4225*.

Para dimensionar o interruptor é necessário calcular a potência dissipada nesse componente, que corresponde à soma das perdas de condução ( $P_{cond}$ ) com as de comutação ( $P_{com}$ ).



A perda de comutação ocorre por conta de existir um tempo de resposta para o interruptor mudar de estado (bloquear ou conduzir). Já as perdas de condução ocorrem devido a existência de uma resistência quando a chave conduz.

Considerando o gráfico na folha de dados do fabricante que relaciona o fator de correção ( $\alpha_{Rd}$ ) com a temperatura de junção, deseja-se uma temperatura de operação na junção inferior ao limite máximo lá indicado, que é 150 °C. Assim, para estimar as perdas de condução, considera-se uma temperatura de junção de 50 °C e usa-se o valor de  $\alpha_{Rd} = 1.25$ .

A Tabela 18 mostra os parâmetros utilizados para os cálculos das perdas apresentadas nas equações de (59) a (63).

Tabela 18 – Conversor Forward – Parâmetros para o dimensionamento do interruptor

Tensão máxima na chave no <i>Turn-Off</i>	$V_{S.máxoff} (V)$	200
Tensão máxima na chave na <i>Turn-On</i>	$V_{S.máxon} (V)$	100
Corrente máxima na chave no bloqueio (simulação)	$I_{S.máxoff} (A)$	5,25
Corrente máxima na chave na condução (simulação)	$I_{S.máxon} (A)$	3,75
<i>Turn-Off Fall Time</i> (folha de dados do fabricante)	$t_f (ns)$	5
<i>Turn-On Rise Time</i> (folha de dados do fabricante)	$t_r (ns)$	28
Frequência de chaveamento	$f_s (kHz)$	47,5
Fator de correção de $R_{DSon}$	$\alpha_{Rd}$	1,25
Resistência <i>Drain-Source</i>	$R_{DSon} (m\Omega)$	99
Valor eficaz da corrente na chave (simulação)	$I_{Sef} (A)$	2,23

$$\begin{aligned} \text{Energia dissipada no Turn-Off da chave} \quad W_{off} &= 0.5 \cdot V_{S.máxoff} \cdot I_{S.máxoff} \cdot t_f \\ &= 2,625 \mu J \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \text{Energia dissipada no Turn-On da chave} \quad W_{on} &= 0.5 \cdot V_{S.máxon} \cdot I_{S.máxon} \cdot t_r \\ &= 4,5 \mu J \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \text{Perda de comutação} \quad P_{com} &= (W_{off} + W_{on}) \cdot f_s \\ &= 0,338 W \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} \text{Perda de condução} \quad P_{cond} &= \alpha_{Rd} \cdot R_{DSon} \cdot I_{Sef}^2 \\ &= 0,615 W \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \text{Potência total dissipada na chave} \quad P_{S.TOTAL} &= P_{com} + P_{cond} = 0,954 W \end{aligned} \quad (63)$$

O dissipador foi utilizado a fim de deixar a temperatura de junção da chave ( $T_{j,S}$ ) em torno de 50 °C. Em (64) tem-se o cálculo da temperatura de junção considerando  $P_{S.TOTAL}$  anteriormente calculado e a resistência térmica junção-ambiente ( $R_{Th,da}$ ). Essa resistência é calculada considerando o uso do dissipador. A Tabela 19 apresenta alguns parâmetros utilizados para o dimensionamento do dissipador.

Tabela 19 – Conversor *Forward* - Parâmetros para o dimensionamento do dissipador do interruptor

Resistência térmica junção-cápsula (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,jc} (^\circ C/W)$	0,55
Resistência térmica cápsula-dissipador (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,cd} (^\circ C/W)$	1
Resistência térmica dissipador-ambiente (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,da} (^\circ C/W)$	6,98
Resistência térmica junção-ambiente	$R_{Th,ja} (^\circ C/W)$	8,53
Temperatura ambiente	$T_{amb} (^\circ C)$	40

$$T_{j,S} = T_{amb} + P_{S.TOTAL} \cdot R_{Th,ja} = 48,14^\circ C \quad (64)$$

## B.6 DIODOS $D_1$ , $D_{RL}$ , $D_3$

Os diodos são escolhidos levando em consideração quatro requisitos, são eles: a tensão máxima sobre o diodo, a frequência de comutação, o valor eficaz e médio da corrente no diodo, e a temperatura máxima na junção.

Nos três diodos  $D_1$ ,  $D_{RL}$  e  $D_3$  foram utilizados o modelo *MUR4100E* da *ON Semiconductor*<sup>®</sup>. Esse modelo aguenta uma tensão reversa de até 1000 V e uma temperatura de junção de até 175°C.

Primeiramente, foram estimados os valores da queda de tensão reversa no diodo ( $V_{to}$ ) e da resistência equivalente do diodo ( $R_d$ ) através de uma linearização dos pontos de operação da curva corrente ( $I_f$ ) por tensão ( $V_f$ ) instantânea apresentada na folha de dados do componente. Para essa linearização, utilizou-se os valores máximos e mínimos das correntes quando os diodos estão conduzindo. Essa análise foi feita para a curva de temperatura de junção de 25 °C. O cálculo para essa linearização é apresentado em (65) e (66).

$$R_d = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{I_{f2} - I_{f1}} \quad (65)$$

$$V_{To} = \frac{V_{f1} \cdot I_{f2} - V_{f2} \cdot I_{f1}}{I_{f2} - I_{f1}} \quad (66)$$

Com esses valores estimados, calculou-se as potências consumidas ( $P_{loss}$ ) por esses diodos e determinou-se as temperaturas de junção dos diodos ( $T_j$ ).

$$P_{loss} = V_{To} \cdot I_{Dmed} + R_d \cdot I_{Def}^2 \quad (67)$$

onde  $I_{Dmed}$  é o valor médio da corrente do diodo e  $I_{Def}$  é o valor eficaz da corrente do diodo.

$$T_j = T_{amb} + P_{loss} \cdot R_{th,ja} \quad (68)$$

onde  $R_{th,ja}$  é a resistência junção-ambiente do diodo.

Os resultados do dimensionamento dos diodos  $D_1$ ,  $D_{RL}$  e  $D_3$  estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Conversor Forward – Dimensionamento dos diodos  $D_1$ ,  $D_{RL}$  e  $D_3$

	$D_1$	$D_{RL}$	$D_3$
$I_{f1}$ (A)	1,85	1,85	0,00
$I_{f2}$ (A)	2,20	2,20	0,70
$V_{f1}$ (V)	1,10	1,10	0,60
$V_{f2}$ (V)	1,16	1,16	0,92
$V_{To}$ (V)	0,78	0,78	0,60
$R_d$ ( $\Omega$ )	0,171	0,171	0,46
$I_{Dmed}$ (A)	1,53	1,53	0,08
$I_{Def}$ (A)	1,77	1,77	0,20
$R_{th,ja}$ ( $^{\circ}C/W$ )	28	28	28
$P_{loss}$ (W)	1,73	1,73	0,07
$T_{abm}$ ( $^{\circ}C$ )	40	40	40
$T_j$ ( $^{\circ}C$ )	88,58	88,58	41,86

Fonte: Autoria Própria

## B.7 CIRCUITO DE GRAMPEAMENTO

O circuito de grampeamento é um circuito de proteção da chave. Ele é usado para impedir que a tensão sobre a chave não ultrapasse seu limite máximo de tensão.

O protótipo foi projetado utilizando um *mosfet FCP099N65S3* cujo limite de tensão entre os terminais *dreno* e *source* é de 650 V. Logo, o grampeamento da tensão ( $V_g$ ) deve ser menor que 650 V.

Existem duas maneiras de se calcular a potência dissipada no grampeamento. A primeira com a multiplicação de  $V_g$  com  $I_{Dgmed}$ , e a segunda com a divisão do quadrado de  $V_g$  com  $R_g$ , onde  $I_{Dgmed}$  é o valor médio da corrente no diodo e  $R_g$  o valor da resistência de grampeamento.

$$P_g = \frac{V_g^2}{R_g} = V_g \cdot I_{Dgmed} \quad (69)$$

Acha-se o valor da tensão ( $V_g$ ) e da resistência ( $R_g$ ) de grampeamento quando as duas potências calculadas são iguais.

Logo, escolhendo um resistor  $R_g$  de 11,5 k $\Omega$ , a tensão  $V_g$  será aproximadamente de 248 V.

Os resultados estão apresentados nas equações (70) e (71).

$$P_g = \frac{V_g^2}{R_g} = 5,348W \quad (70)$$

$$P_g = V_g \cdot I_{Dgmed} = 5,365W \quad (71)$$

Onde:

- O valor médio da corrente no diodo ( $I_{Dgmed}$ ):

$$I_{Dgmed} = (I_{Lm} \cdot \Delta t_1 + \frac{I_{opri} \cdot \Delta t_1}{2} + \frac{I_{Lm} \cdot \Delta t_2}{2}) \cdot f_s = 0,022A \quad (72)$$

- Valor médio da corrente na carga referida ao primário ( $I_{opri}$ ):

$$I_{opri} = \frac{I_o}{n} = 4,066 A \quad (73)$$

- Intervalo de tensão  $\Delta t_1$ :

$$\Delta t_1 = \frac{(l_1 + l_2) \cdot I_{opri}}{V_g - E} = 202,335 ns \quad (74)$$

- Intervalo de tensão  $\Delta t_2$ :

$$\Delta t_2 = \frac{(l_1 + l_3) \cdot I_{Lm}}{V_g - 2E} = 29,615 ns \quad (75)$$

- Valor máximo da corrente que circula na indutância magnetizante ( $I_{Lm}$ ):

$$I_{Lm} = 0,1 \cdot I_o = 0,203A \quad (76)$$

- Indutâncias de dispersão do transformador ( $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ) respectivamente iguais a 1,51221 $\mu$ H, 5,8534  $\mu$ H e 5,48074  $\mu$ H.

O capacitor de grampeamento ( $C_g$ ) escolhido foi de filme 0,39  $\mu$ F/250 V. O diodo de grampeamento ( $D_g$ ) escolhido foi o *MUR4100E* da *ON Semiconductor*<sup>®</sup>. O dimensionamento foi feito da mesma maneira que os diodos  $D_1$ ,  $D_{RL}$  e  $D_3$ .

Tabela 21 – Conversor Forward – Dimensionamento do diodo  $D_g$ 

	D1
$I_{f1}$ (A)	0,00
$I_{f2}$ (A)	0,80
$V_{f1}$ (V)	0,60
$V_{f2}$ (V)	0,95
$V_{TO}$ (V)	0,60
$R_d$ ( $\Omega$ )	0,44
$I_{Dmed}$ (A)	0,02
$I_{Def}$ (A)	0,10
$R_{th,ja}$ ( $^{\circ}C/W$ )	28
$P_{loss}$ (W)	0,02
$T_{abm}$ ( $^{\circ}C$ )	40
$T_j$ ( $^{\circ}C$ )	40,45

Fonte: Autoria Própria

## B.8 CIRCUITO DE COMANDO DA CHAVE

O comando da chave é feito utilizando o *CI UC3525*. Esse CI é um modulador de largura de pulso com uma referência interna de 5,1 V.

Na modulação por largura de pulso (*PWM*) define-se um ciclo de trabalho ( $D$ ) através da comparação entre um sinal de controle e uma onda portadora dente de serra.

### B.7.1 Ajuste frequência de chaveamento

A frequência de chaveamento da chave é determinada pela frequência da onda dente de serra. Para isso, dois componentes externos do *CI*, um resistor  $R_T$  e um capacitor  $C_T$ , são utilizados.

Como a frequência de chaveamento do projeto é de 47,5 kHz. Utilizando um capacitor de 10 nF, seria necessária uma resistência de 3,008 k $\Omega$  (77). Então, usou-se um *trimpot* de 10 k $\Omega$ .

$$R_T = \frac{1,4286}{f_S \cdot C_T} = 3,008 \text{ k}\Omega \quad (77)$$

### B.7.2 Ajuste da razão cíclica

A razão cíclica é resultado da comparação de uma tensão  $V_C$  com a onda dente de serra gerada no *CI*.

A tensão  $V_C$  é a tensão aplicada no terminal 2 do *CI*. O ajuste dessa tensão é feito através de um divisor de tensão com dois resistores e um *trimpot*. A fonte de tensão de 5,1 V (terminal 16) é utilizada como referência no divisor.

Sabendo que a razão cíclica deseja é 0,246, e que os limites da onda dente de serra são 0,86 V ( $V_{portmin}$ ) e 2,9 V ( $V_{portmax}$ ), obtém-se que a tensão  $V_C$  é igual a 1,362 V (78).

$$V_C = D \cdot (V_{portmax} - V_{portmin}) + V_{portmin} = 1,362 \text{ V} \quad (78)$$

Então, escolheu-se utilizar um resistor de 22 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  e um *trimpot* de 10 k $\Omega$  no divisor de tensão.

## APÊNDICE C – Projeto do Protótipo 2 (*Buck*)

O segundo protótipo construído foi um conversor *Buck* cujas especificações são:

- Potência ( $P$ ): 500 W;
- Tensão de entrada ( $V_i$ ): 100 V;
- Variação máxima da tensão na entrada ( $\Delta V_i$ ): 5 V;
- Corrente de entrada ( $I_i$ ): 5 A;
- Tensão de saída ( $V_o$ ): 53,385 V;
- Variação máxima da tensão na saída ( $\Delta V_o$ ): 1 V;
- Corrente na carga ( $I_o$ ): 9,366 A;
- Frequência de chaveamento ( $f_s$ ): 40 kHz;
- Resistência de carga ( $R_o$ ): 5,7  $\Omega$ ;
- Variação máxima da tensão no indutor de saída ( $\Delta I_{L_{omax}}$ ): 2,046 V.

O projeto desse protótipo foi feito conforme descrito por Barbi e Martins (2008) e MCLYMAN (2011).

### C.1 PROJETO DO INDUTOR DE SAÍDA $L_o$

O núcleo escolhido para a montagem do indutor foi o *E55/28*. Esse núcleo apresenta a área da seção central do núcleo ( $A_e$ ) igual a 3,54 cm<sup>2</sup>, a área da janela do carretel ( $A_w$ ) igual a 2,5 cm<sup>2</sup> e a largura do carretel ( $d_w$ ) igual a 37 mm. O projeto do indutor utilizou (79) e (80) retiradas de MCLYMAN (2011). Foram consideradas um total de 31,5 espiras ( $N_{L_o}$ ) e um entreferro ( $gap$ ) de 2 mm. A permeabilidade magnética do ar no vácuo ( $\mu_0$ ) é de  $4\pi 10^{-7}$  H/m.

$$A_{L_{L_o}} = \mu_0 \cdot \frac{A_e}{gap} \cdot \left(1 + \frac{gap}{\sqrt{A_e}} \cdot \ln\left(\frac{2d_w}{gap}\right)\right) \quad (79)$$

$$L_o = A_{L_{L_o}} \cdot N_{L_o}^2 = 305,414 \mu H \quad (80)$$

A maior variância sofrida pela corrente no indutor de saída será quando a razão cíclica for 0,5. Assim, nesse experimento a maior variância da corrente possível será de 2,046 A (81). Fazendo com que a corrente máxima atingida nesse indutor seja de 10,389 A (82).

$$\Delta I_{L_{omax}} = \frac{V_i}{4 \cdot f_s \cdot L_o} = 2,046 A \quad (81)$$

$$I_{L_{omax}} = I_{L_{omed}} + 0,5 \cdot \Delta I_{L_o} = 10,389 A \quad (82)$$

onde  $I_{L_{omed}}$  é igual ao valor médio da corrente na carga  $I_o$ .

A máxima densidade de campo magnético será de 0,285 T, como mostrado em (83).

$$B_{max} = \frac{L_o \cdot I_{L_{omax}}}{N_{L_o} \cdot A_e} = 0,285 T \quad (83)$$

Para validar a escolha do núcleo é preciso saber se o produto  $A_e A_w$  calculado é menor que 8,85cm<sup>4</sup>. Para isso supõe-se que a densidade de corrente seja no máximo ( $J_{máx}$ ) 450 A/cm<sup>2</sup> e o fator de utilização ( $k_W$ ) seja de 0,7. Substituindo as variáveis em (84), o produto  $A_e A_w$  será de 3,316cm<sup>4</sup>.

$$A_e \cdot A_w = \frac{I_{L_{omed}} \cdot I_{L_{omax}} \cdot L_o}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_W} \quad (84)$$

Área de cobre ( $S_{Lo}$ ) necessária será de  $2,081\text{mm}^2$ . Assim, seriam necessários 261 fios AWG38 em paralelo. Por praticidade, foi escolhido trabalhar com dois fio Litz/AWG38 de 180 condutores em paralelo. O entreferro desse indutor foi feito com papel *sulfite*.

$$S_{Lo} = \frac{I_{Lomed}}{J_{max}} \quad (85)$$

Para ver a possibilidade de execução do projeto do indutor é necessário calcular a menor janela  $A_{Wmin}$  que os condutores irão ocupar, essa por sua vez precisa ser menor que o valor da janela do núcleo utilizado. Em (86) concluiu-se que o projeto é executável.

$$A_{Wmin} = \frac{N_{Lo} \cdot n_{condutores} \cdot S_{AWG38}}{k_W} = 2,106 \text{ cm}^2 \quad (86)$$

onde  $n_{condutores}$  é o número total de condutores, nesse caso 360.

A perda no cobre ( $P_{Locobre}$ ) é a perda relacionada a resistência do enrolamento ( $R_{Locobre}$ ) calculada em (87), onde:  $\rho_{AWG38}$  é a resistividade de um fio AWG38 por cm ( $0.022 \Omega/\text{cm}$ ) e  $l_{espira}$  é o comprimento médio de uma espira do núcleo usado ( $0.112 \text{ m}$ ).

$$R_{Locobre} = \frac{\rho_{AWG38} \cdot l_{espira} \cdot N_{Lo}}{n_{condutores}} = 0,021 \Omega \quad (87)$$

A perda no cobre é calculada em (88), onde o valor eficaz da corrente no indutor foi aproximado pelo valor médio dela.

$$P_{Locobre} = R_{Locobre} \cdot I_{Lorms}^2 = 1,848 \text{ W} \quad (88)$$

A perda magnética no núcleo é dada em (89), onde:  $K_h$  é  $4 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_f$  é  $4 \cdot 10^{-10}$  e  $V_{E55}$  é o volume do núcleo E55 ( $42,50 \text{ cm}^3$ ).

$$P_{Lonúcleo} = \left( \frac{B_{max} \cdot \Delta I_{Lomax}}{I_{Lomax}} \right)^{2,4} \cdot (K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2) \cdot V_{E55} = 9,445 \cdot 10^{-8} \text{ W} \quad (89)$$

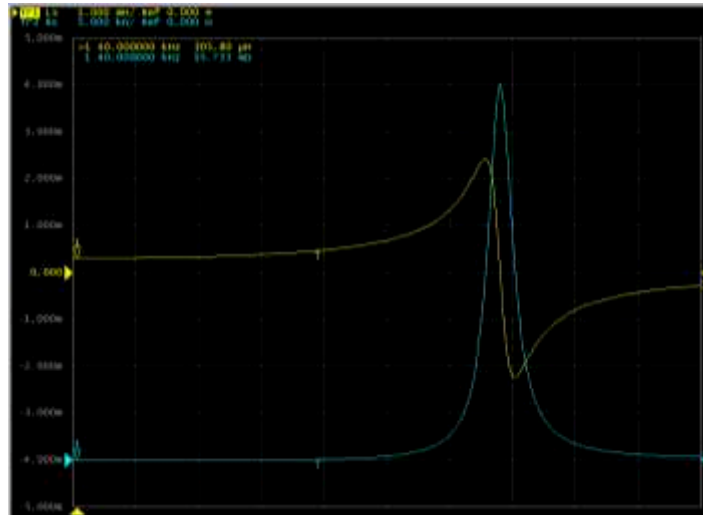
O núcleo irá sofrer uma elevação na temperatura ( $\Delta T$ ) de  $18,972 \text{ }^\circ\text{C}$  (91). Para o cálculo da elevação da temperatura é necessário primeiramente calcular a resistência térmica do núcleo, apresentado em (90).

$$R_{t_{E55}} = 23 \cdot (A_e \cdot A_W)^{-0,37} = 10,265 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (90)$$

$$\Delta T = (P_{Locobre} + P_{Lonúcleo}) \cdot R_{t_{E55}} = 18,972^\circ\text{C} \quad (91)$$

O transformador construído na prática apresentou uma indutância aproximadamente de  $305,80 \mu\text{H}$  como mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Curva da variação da indutância pela frequência do indutor de saída ( $L_o$ ) do protótipo do conversor Buck



Fonte: Autoria Própria

## C.2 CAPACITOR DE SAÍDA $C_o$

Para dimensionar o capacitor, é necessário que o componente escolhido suporte uma tensão contínua maior que 54 V, atenda uma corrente eficaz maior que 600 mA na frequência de 40 Hz e que tenha capacitância mínima de 8,142  $\mu\text{F}$  (92). Por isso, escolheu-se utilizar 6 capacitores da HITANO de 10  $\mu\text{F}/400$  V em paralelo.

$$C_o = \frac{\Delta I_{L_o}}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \Delta V_o} = 8,142 \mu\text{H} \quad (92)$$

Para a escolha, foi analisado o valor da corrente corrigida para 120 Hz. O fabricante fornece uma constante que relaciona a corrente de 120 Hz com outras frequências. Na folha de dados do fabricante, tal constante para uma frequência de 40 kHz é de 1,65. A corrente corrigida foi de 363 mA. Pelos dados do fabricante quatro capacitores já seriam o suficiente para suprir essa corrente, mas resolveu-se utilizar seis por segurança.

A potência ativa consumida pelos capacitores está relacionada a resistência série equivalente do capacitor ( $ESR$ ). Para calculá-la é necessário saber o fator de dissipação ( $\tan\delta$ ) do capacitor usado, nesse caso, será 0,2. Em (93) tem-se o cálculo do  $ESR$ , e em (94) o calcula da potência ativa consumida considerando o valor eficaz da corrente de 600 mA.

$$ESR = \frac{\tan\delta}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_o} = \frac{0,2}{2 \cdot \pi \cdot 40000\text{Hz} \cdot 60\mu\text{F}} = 0,013\Omega \quad (93)$$

$$P_{C_o} = ESR \cdot I_{C_o_{rms}}^2 = 4,775 \text{ mW} \quad (94)$$

## C.3 PROJETO DO INDUTOR DE ENTRADA $L_i$

O núcleo escolhido para a montagem do indutor foi o  $E42/15$ . Esse núcleo apresenta as áreas  $A_e$  e  $A_w$ , respectivamente, iguais a 1,81  $\text{cm}^2$  e 1,57  $\text{cm}^2$ . E apresenta o  $dW$  igual a 30 mm. Considerando um entreferro (gap) de 1 mm e um total de 33 espiras ( $NL_i$ ), a indutância do indutor será de 323,075  $\mu\text{H}$  (95) e (96).

$$A_{Li} = \mu_0 \cdot \frac{A_e}{gap} \cdot \left(1 + \frac{gap}{\sqrt{A_e}} \cdot \ln\left(\frac{2d_w}{gap}\right)\right) \quad (95)$$

$$L_i = A_{Li} \cdot N_{Li}^2 = 323,075 \mu H \quad (96)$$

A maior variância sofrida pela corrente no indutor de saída será quando a razão cíclica for 0,5. Assim, nesse experimento a maior variância da corrente possível será de 0,047 A (97), quando  $C_i$  for igual a 12,34  $\mu F$ . Fazendo com que a corrente máxima atingida nesse indutor seja de 5,024 A (98).

$$\Delta I_{Limax} = \frac{I_o}{31 \cdot f_s^2 \cdot L_i \cdot C_i} = 0,047 A \quad (97)$$

$$I_{Limax} = I_{Limed} + 0,5 \cdot \Delta I_{Li} = 5,024 A \quad (98)$$

onde  $I_{Limed}$  é igual ao valor médio da corrente de entrada  $I_i$ .

A máxima densidade de campo magnético será de 0,272 T, como mostrado em (99).

$$B_{max} = \frac{L_i \cdot I_{Limax}}{N_{Li} \cdot A_e} = 0,272 T \quad (99)$$

Para validar a escolha do núcleo é preciso saber se o produto  $AeAw$  calculado é menor que  $2,84 \text{ cm}^4$ . Para isso supõe-se que a densidade de corrente seja no máximo ( $J_{máx}$ )  $450 \text{ A/cm}^2$  e o fator de utilização ( $k_W$ ) seja de 0,7. Substituindo as variáveis em (100), o produto  $AeAw$  será de  $0,948 \text{ cm}^4$ .

$$A_e \cdot A_w = \frac{I_{Limed} \cdot I_{Limax} \cdot L_i}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_W} \quad (100)$$

Área de cobre ( $SL_i$ ) necessária será de  $1,111 \text{ mm}^2$  (101). Assim, seriam necessários 3 fios AWG21 em paralelo. O entreferro desse indutor foi feito com papel *sulfite*.

$$S_{Li} = \frac{I_{Limed}}{J_{max}} \quad (101)$$

Para ver a possibilidade de execução do projeto do indutor é necessário calcular a menor janela  $A_{Wmin}$  que os condutores irão ocupar, essa por sua vez precisa ser menor que o valor da janela do núcleo utilizado. Em (102) concluí-se que o projeto é executável.

$$A_{Wmin} = \frac{N_{Li} \cdot n_{condutores} \cdot S_{AWG21}}{k_W} = 0,708 \text{ cm}^2 \quad (102)$$

onde  $n_{condutores}$  é o número total de condutores, nesse caso 3.

A perda no cobre ( $P_{Locobre}$ ) é a perda relacionada a resistência do enrolamento ( $R_{Locobre}$ ) calculada em (103), onde:  $\rho_{AWG21}$  é a resistividade de um fio AWG21 por cm ( $0,000419 \Omega/\text{cm}$ );  $l_{espira}$  é o comprimento médio de uma espira do núcleo usado ( $0,097 \text{ m}$ ); e  $n_{condutores}$  é o número total de condutores, nesse caso 3.

$$R_{Licobre} = \frac{\rho_{AWG21} \cdot l_{espira} \cdot N_{Lo}}{n_{condutores}} = 0,045 \Omega \quad (103)$$

A perda no cobre é calculada em (104), onde o valor eficaz da corrente no indutor foi aproximado pelo valor médio dela.



$$P_{Licobre} = R_{Licobre} \cdot I_{Lirms}^2 = 1,118 \text{ W} \quad (104)$$

A perda magnética no núcleo é dada em (105), onde:  $K_h$  é  $4 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_f$  é  $4 \cdot 10^{-10}$  e  $V_{E4215}$  é o volume do núcleo E42/15 ( $17,10 \text{ cm}^3$ ).

$$P_{Linúcleo} = \left( \frac{B_{max} \cdot \Delta I_{Limax}}{I_{Limax}} \right)^{2,4} \cdot (K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2) \cdot V_{E4215} \quad (105)$$

$$= 2,311 \cdot 10^{-11} \text{ W}$$

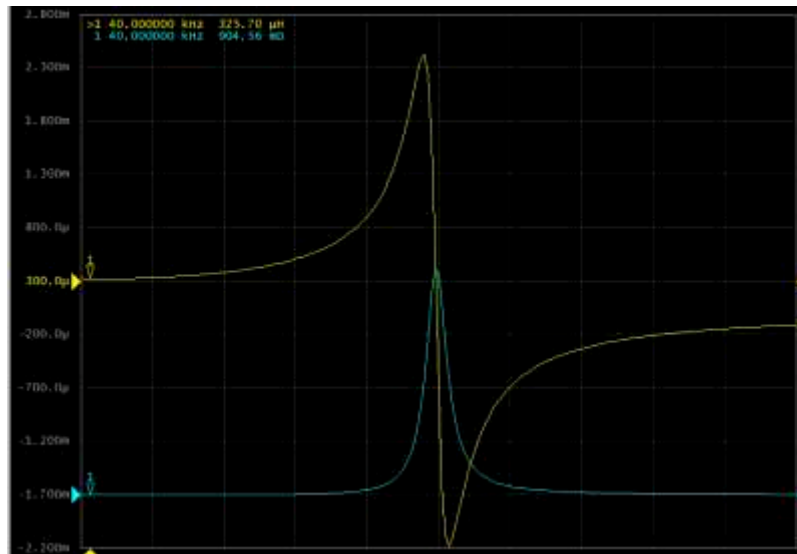
O núcleo irá sofrer uma elevação na temperatura ( $\Delta T$ ) de  $28,884 \text{ }^\circ\text{C}$  (107). Para o cálculo da elevação da temperatura é necessário primeiramente calcular a resistência térmica do núcleo, apresentado em (106).

$$R_{t_{E4215}} = 23 \cdot (A_e \cdot A_w)^{-0,37} = 15,628 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (106)$$

$$\Delta T = (P_{Licobre} + P_{Linúcleo}) \cdot R_{t_{E4215}} = 28,884^\circ\text{C} \quad (107)$$

O transformador construído na prática apresentou uma indutância aproximadamente de  $325,70 \text{ mH}$  (Figura 49).

Figura 49 – Curva da variação da indutância pela frequência do indutor de entrada (Li) do protótipo do conversor Buck



Fonte: Autoria Própria

#### C.4 CHAVE $S_1$

A chave escolhida foi a *FCP099N65S3* da *ON Semiconductor*<sup>®</sup>. Com dissipador HS4225 com  $5 \text{ cm}$  de altura.

Para dimensionar o interruptor é necessário calcular a potência dissipada nesse componente, que corresponde à soma das perdas de condução ( $P_{cond}$ ) com as de comutação ( $P_{com}$ ).

A perda de comutação ocorre por conta de existir um tempo de resposta para o interruptor mudar de estado (bloquear ou conduzir). Já as perdas de condução ocorrem devido a existência de uma resistência quando a chave conduz.

Considerando o gráfico na folha de dados do fabricante que relaciona o fator de correção ( $\alpha_{Rd}$ ) com a temperatura de junção, deseja-se uma temperatura de operação na junção inferior ao limite

máximo indicado, que é 150 °C. Assim, para estimar as perdas de condução, considera-se uma temperatura de junção de 100 °C e usa-se o valor de  $\alpha_{Rd} = 1,75$ .

A Tabela 22 mostra os parâmetros utilizados para os cálculos das perdas apresentadas nas equações de (108) a (112).

Tabela 22 – Conversor Forward – Parâmetros para o dimensionamento do interruptor

Tensão máxima na chave no <i>Turn-Off</i>	$V_{S.máxoff} (V)$	100
Tensão máxima na chave na <i>Turn-On</i>	$V_{S.máxon} (V)$	100
Corrente máxima na chave no bloqueio (simulação)	$I_{S.máxoff} (A)$	10,70
Corrente máxima na chave na condução (simulação)	$I_{S.máxon} (A)$	8,82
<i>Turn-Off Fall Time</i> (folha de dados do fabricante)	$t_f (ns)$	5
<i>Turn-On Rise Time</i> (folha de dados do fabricante)	$t_r (ns)$	24
Frequência de chaveamento	$f_s (kHz)$	40
Fator de correção de $R_{DSon}$	$\alpha_{Rd}$	1,75
Resistência <i>Drain-Source</i>	$R_{DSon} (m\Omega)$	99
Valor eficaz da corrente na chave (simulação)	$I_{Sef} (A)$	7,00

$$\text{Energia dissipada no Turn-Off da chave} \quad W_{off} = 0.5 \cdot V_{S.máxoff} \cdot I_{S.máxoff} \cdot t_f = 2,675 \mu J \quad (108)$$

$$\text{Energia dissipada no Turn-On da chave} \quad W_{on} = 0.5 \cdot V_{S.máxon} \cdot I_{S.máxon} \cdot t_r = 10,584 \mu J \quad (109)$$

$$\text{Perda de comutação} \quad P_{com} = (W_{off} + W_{on}) \cdot f_s = 0,530 W \quad (110)$$

$$\text{Perda de condução} \quad P_{cond} = \alpha_{Rd} \cdot R_{DSon} \cdot I_{Sef}^2 = 8,514 W \quad (111)$$

$$\text{Potência total dissipada na chave} \quad P_{S.TOTAL} = P_{com} + P_{cond} = 9,04 W \quad (112)$$

O dissipador foi utilizado afim de deixar a temperatura de junção da chave ( $T_{j,s}$ ) em torno de 100 °C. Em (113) tem-se o cálculo da temperatura de junção considerando  $P_{S.TOTAL}$  anteriormente calculado e a resistência térmica junção-ambiente ( $R_{Th,da}$ ). Essa resistência é calculada considerando o uso do dissipador. A Tabela 23 apresenta alguns parâmetros utilizados para o dimensionamento do dissipador.

Tabela 23 – Conversor Forward - Parâmetros para o dimensionamento do dissipador do interruptor

Resistência térmica junção-cápsula (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,jc} (^{\circ}C/W)$	0,55
Resistência térmica cápsula-dissipador (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,cd} (^{\circ}C/W)$	1
Resistência térmica dissipador-ambiente (folha de dados do fabricante)	$R_{Th,da} (^{\circ}C/W)$	6,28
Resistência térmica junção-ambiente	$R_{Th,ja} (^{\circ}C/W)$	7,83
Temperatura ambiente	$T_{amb} (^{\circ}C)$	40

$$T_{j,s} = T_{amb} + P_{S.TOTAL} \cdot R_{Th,ja} = 110,79^{\circ}C \quad (113)$$

## C.5 DIODO $D_{RL}$

Os diodos são escolhidos levando em consideração quatro requisitos, são eles: a tensão máxima sobre o diodo, a frequência de comutação, o valor eficaz e médio da corrente no diodo, e a temperatura máxima na junção.

O diodo escolhido foi *FFSP20120A* da *ON Semiconductor*®. Esse diodo é Schottky de carboneto de silício (*SiC*) uma tecnologia que permite melhor comutação. Esse modelo aguenta uma

tensão reversa de até 1200 V e uma temperatura de junção de até 175 °C. O dissipador utilizado foi o HS4225 com 4 cm de altura.

Primeiramente, foram estimados os valores da queda de tensão reversa no diodo ( $V_{to}$ ) e da resistência equivalente do diodo ( $R_d$ ) através de uma linearização dos pontos de operação da curva corrente ( $I_f$ ) por tensão ( $V_f$ ) instantânea apresentada na folha de dados do componente. Para essa linearização, utilizou-se os valores máximos e mínimos das correntes quando os diodos estão conduzindo. Essa análise foi feita para a curva de temperatura de junção de 25 °C. O cálculo para essa linearização é apresentado em (114) e (115).

$$R_d = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{I_{f2} - I_{f1}} \quad (114)$$

$$V_{To} = \frac{V_{f1} \cdot I_{f2} - V_{f2} \cdot I_{f1}}{I_{f2} - I_{f1}} \quad (115)$$

Com esses valores estimados, calculou-se as potências consumidas ( $P_{loss}$ ) por esses diodos e determinou-se as temperaturas de junção dos diodos ( $T_j$ ), mostrados respectivamente em (116) e (117).

$$P_{loss} = V_{To} \cdot I_{Dmed} + R_d \cdot I_{Def}^2 \quad (116)$$

onde  $I_{Dmed}$  é o valor médio da corrente do diodo e  $I_{Def}$  é o valor eficaz da corrente do diodo.

$$T_j = T_{amb} + P_{loss} \cdot R_{th,ja} \quad (117)$$

onde  $R_{th,ja}$  é a resistência junção-ambiente do diodo.

O resultado do dimensionamento do diodo  $D_{RL}$  está apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Conversor Forward – Dimensionamento do diodo  $D_{RL}$

	$D_{RL}$
$I_{f1}$ (A)	8,76
$I_{f2}$ (A)	10,72
$V_{f1}$ (V)	1,125
$V_{f2}$ (V)	1,2
$V_{To}$ (V)	0,79
$R_d$ ( $\Omega$ )	0,04
$I_{Dmed}$ (A)	4,72
$I_{Def}$ (A)	6,79
$R_{Th,jc}$ ( $^{\circ}C/W$ )	0,44
$R_{Th,cd}$ ( $^{\circ}C/W$ )	1,00
$R_{Th,da}$ ( $^{\circ}C/W$ )	6,98
$R_{th,ja}$ ( $^{\circ}C/W$ )	7,92
$P_{loss}$ (W)	5,49
$T_{abm}$ ( $^{\circ}C$ )	40
$T_j$ ( $^{\circ}C$ )	83,50

Fonte: Autoria Própria

## C.6 CIRCUITO DE COMANDO DA CHAVE

O comando da chave é feito utilizando o CI UC3525. Esse CI é um modulador de largura de pulso com uma referência interna de 5,1 V.

Na modulação por largura de pulso ( $PWM$ ) define-se um ciclo de trabalho ( $D$ ) através da comparação entre um sinal de controle e uma onda portadora dente de serra.

### C.6.1 Ajuste frequência de chaveamento

A frequência de chaveamento da chave é determinada pela frequência da onda dente de serra. Para isso, dois componentes externos do *CI*, um resistor  $R_t$  e um capacitor  $C_t$ , são utilizados.

Como a frequência de chaveamento do projeto é de  $40 \text{ kHz}$ , utilizando um capacitor de  $10 \text{ nF}$ , seria necessária uma resistência de  $3,571 \text{ k}\Omega$  (118). Então, usou-se um *trimpot* de  $10 \text{ k}\Omega$ .

$$R_T = \frac{1,4286}{f_S \cdot C_T} = 3,571 \text{ k}\Omega \quad (118)$$

### C.6.2 Ajuste da razão cíclica

A razão cíclica é resultado da comparação de uma tensão  $V_C$  com a onda dente de serra gerada no *CI*.

A tensão  $V_C$  é a tensão aplicada no terminal 2 do *CI*. O ajuste dessa tensão é feito através de um divisor de tensão com dois resistores e um *trimpot*. A fonte de tensão de  $5,1 \text{ V}$  (terminal 16) é utilizada como referência no divisor.

Sabendo que a razão cíclica deseja é  $0,534$  e que os limites da onda dente de serra são  $0,86 \text{ V}$  ( $V_{portmin}$ ) e  $2,9 \text{ V}$  ( $V_{portmax}$ ), obtém-se que a tensão  $V_C$  é igual a  $1,949 \text{ V}$  (119).

$$V_C = D \cdot (V_{portmax} - V_{portmin}) + V_{portmin} = 1,949V \quad (119)$$

Então, escolheu-se utilizar dois resistores de  $10 \text{ k}\Omega$  e um *trimpot* de  $10 \text{ k}\Omega$  no divisor de tensão.

## APÊNDICE D – Medições feitas no Conversor Buck

### D.1 Capacitor de poliéster 470 nF

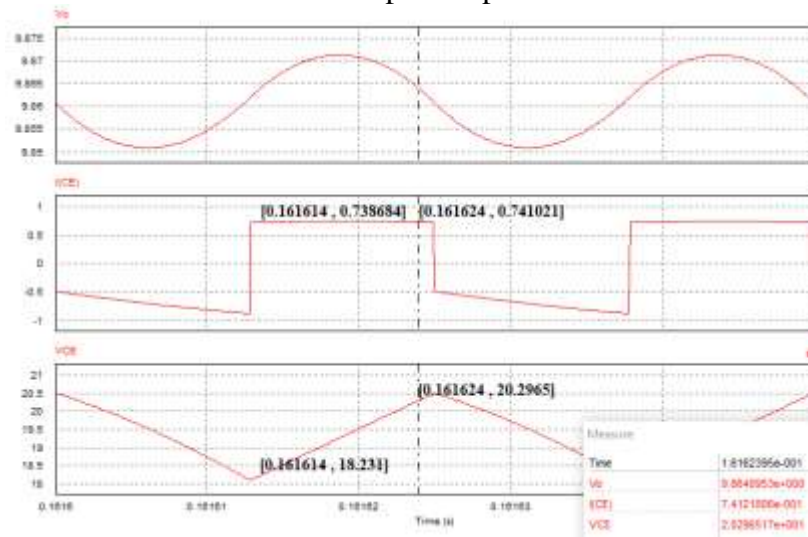
Foram utilizados oito capacitores de poliéster de 470 nF associados em paralelo resultando em 3,76  $\mu\text{F}$ . Como o capacitor tem tolerância de 5%, podemos considerar que a capacitância pode variar de 3,572  $\mu\text{F}$  a 3,948  $\mu\text{F}$ .

#### D.1.1 $V_{in} = 20 \text{ V}$

A Figura 50 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (120):

$$C_e = \frac{(0,738684\text{A} + 0,741021\text{A}) \cdot (0,161624\text{s} - 0,161614\text{s})}{2 \cdot (20,2965\text{V} - 18,231\text{V})} = 3,582\mu\text{F} \quad (120)$$

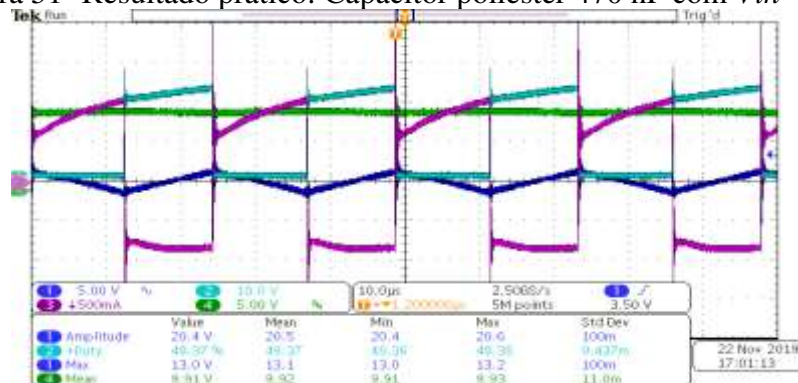
Figura 50 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com  $V_{in} = 20 \text{ V}$



Fonte: Autoria Própria

A Figura 51, mostra o resultado prático para uma tensão de entrada de 20,4 V. A curva em azul claro mostra a tensão na chave. A curva em azul escuro mostra a tensão no capacitor de entrada. A curva em rosa mostra a corrente no capacitor de entrada. E a curva em verde de tensão de saída.

Figura 51- Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF com  $V_{in} = 20 \text{ V}$

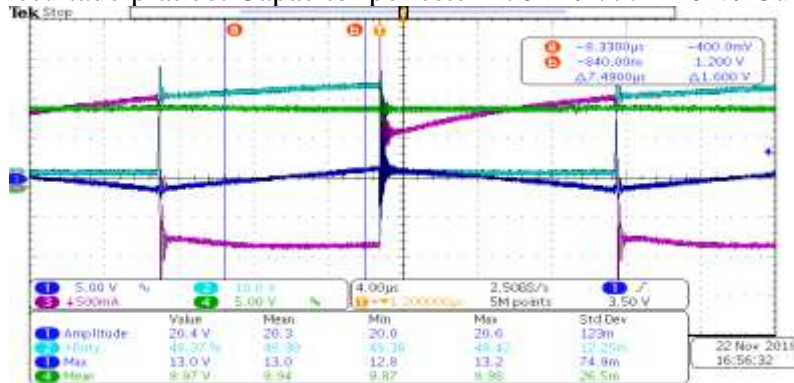


Fonte: Autoria Própria

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 52 e Figura 53. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (121).

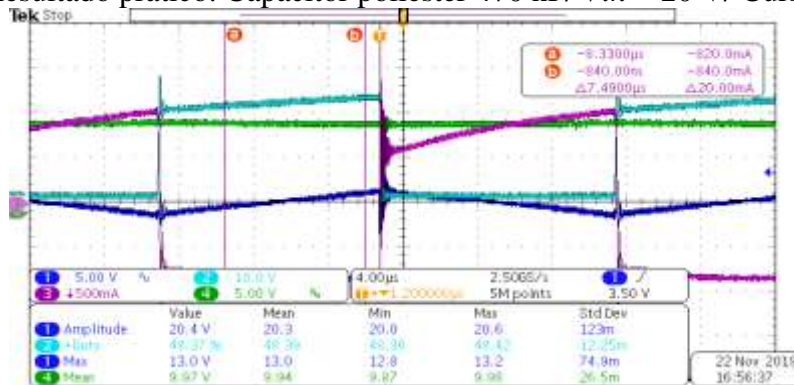
$$C_e = \frac{(0,82A + 0,84A) \cdot 7,39\mu s}{2 \cdot (1,6V)} = 3,885\mu F \quad (121)$$

Figura 52 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 20 V$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 53 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 20 V$ / Cursor de corrente



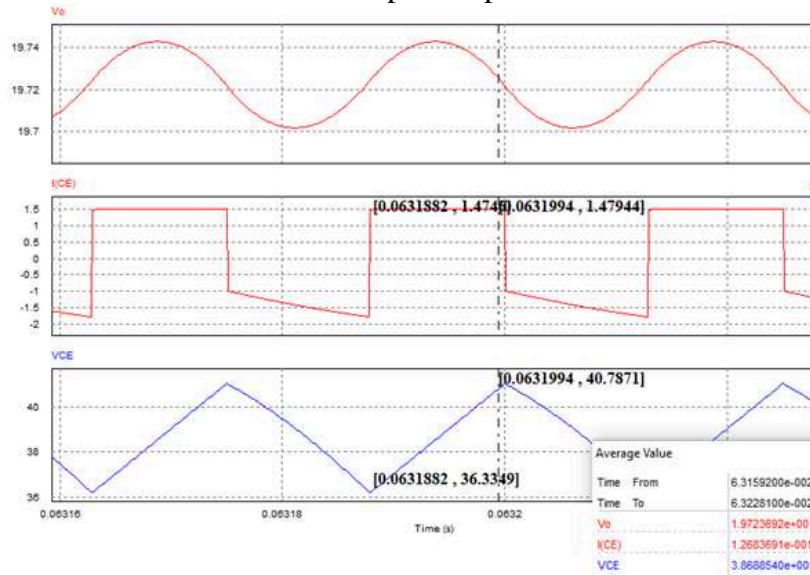
Fonte: Autoria Própria

#### D.1.2 $V_{in} = 40 V$

A Figura 54 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (122).

$$C_e = \frac{(1,4746A + 1,47944A) \cdot (0,0631994s - 0,0631882s)}{2 \cdot (40,7871V - 36,3349V)} = 3,716\mu F \quad (122)$$

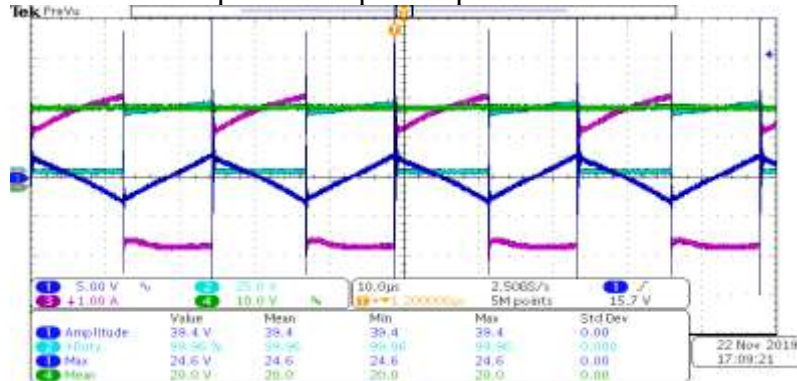
Figura 54 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com  $V_{in} = 40$  V



Fonte: Autoria Própria

A Figura 55, mostra o resultado prático para uma tensão de entrada de 39,4 V. A curva em azul claro mostra a tensão na chave. A curva em azul escuro mostra a tensão no capacitor de entrada. A curva em rosa mostra a corrente no capacitor de entrada. E a curva em verde a tensão de saída.

Figura 55- Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF com  $V_{in} = 20$  V

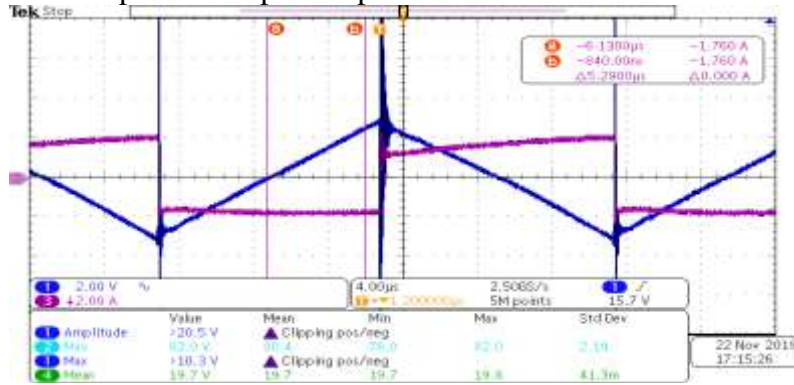


Fonte: Autoria Própria

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 56 e Figura 57. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (123).

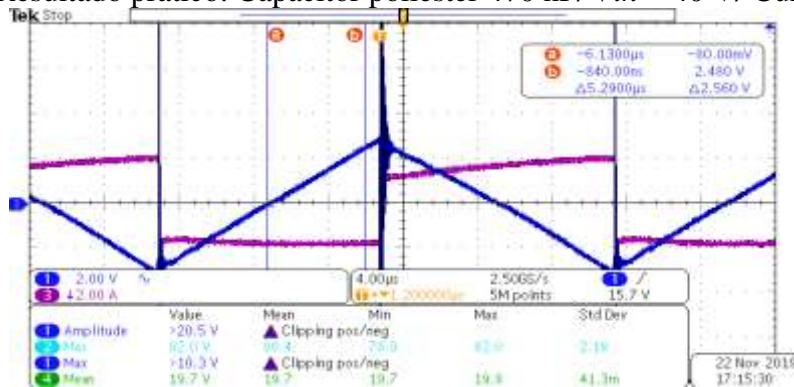
$$C_e = \frac{(1,76A + 1,76A) \cdot 5,29\mu s}{2 \cdot (2,56V)} = 3,637\mu F \quad (123)$$

Figura 56 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 40\text{ V}$ / Cursor de corrente



Fonte: Autoria Própria

Figura 57 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 40\text{ V}$ / Cursor de tensão



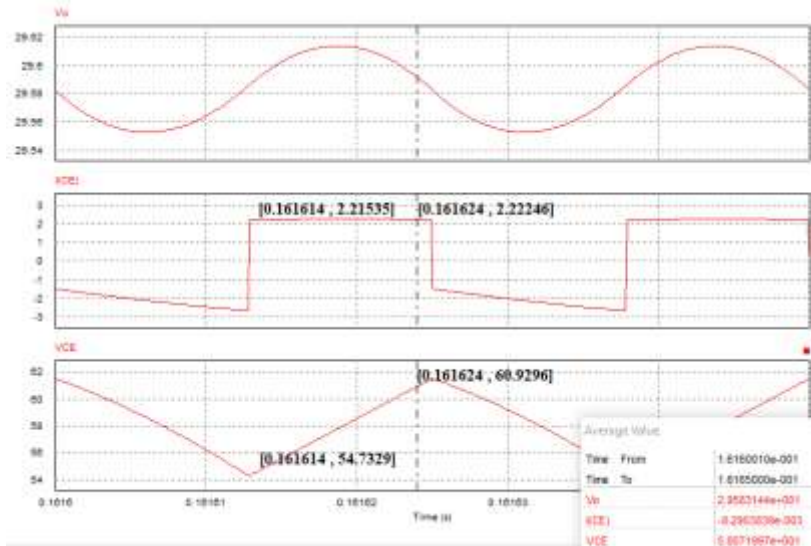
Fonte: Autoria Própria

D.1.3  $V_{in} = 60\text{ V}$

A Figura 58 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (124).

$$C_e = \frac{(2,21535\text{A} + 2,22246\text{A}) \cdot (0,161624\text{s} - 0,161614\text{s})}{2 \cdot (60,9296\text{V} - 54,7329\text{V})} = 3,581\mu\text{F} \quad (124)$$

Figura 58 – Resultado simulado: Capacitor poliéster 470 nF com  $V_{in} = 60\text{ V}$



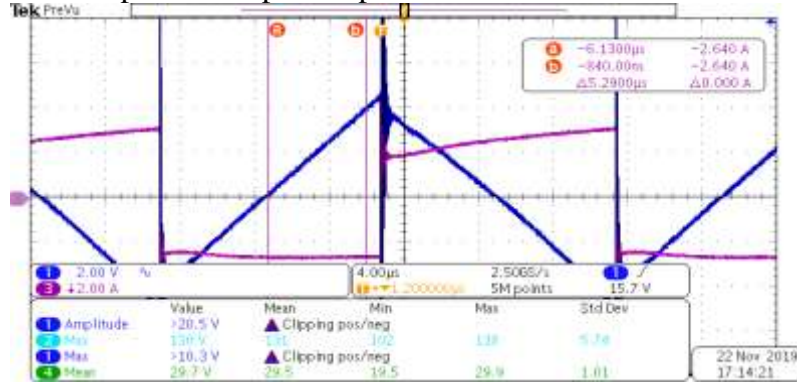
Fonte: Autoria Própria



Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 59 e Figura 60. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (125).

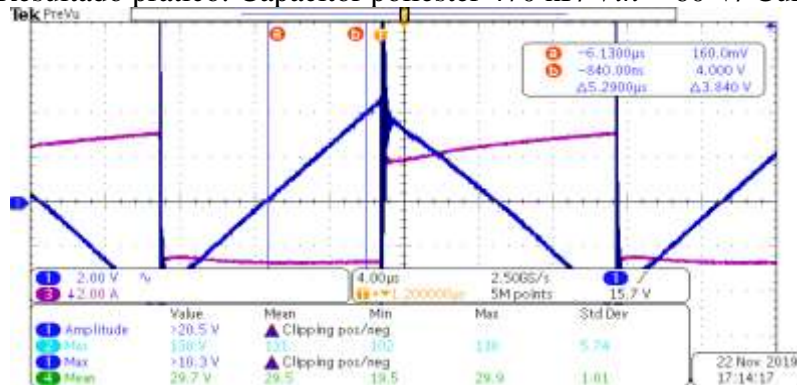
$$C_e = \frac{(2,64\text{A} + 2,64\text{A}) \cdot 5,29\mu\text{s}}{2 \cdot (3,84\text{V})} = 3,637\mu\text{F} \quad (125)$$

Figura 59 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 60\text{ V}$ / Cursor de corrente



Fonte: Autoria Própria

Figura 60 - Resultado prático: Capacitor poliéster 470 nF/  $V_{in} = 60\text{ V}$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

### D.2 Capacitor de polipropileno 1 μF

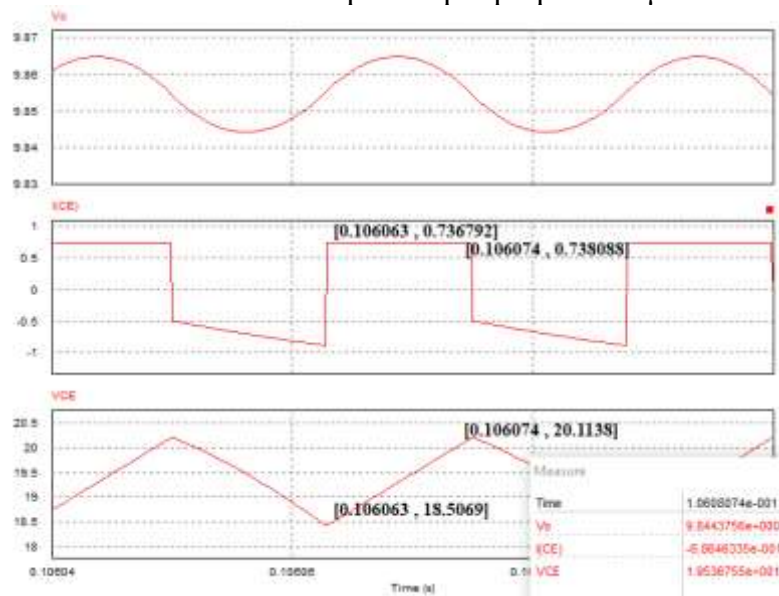
Foram utilizados cinco capacitores de poliéster de 1 μF associados em paralelo resultando em 5 μF. Como o capacitor tem tolerância de 5%, podemos considerar que a capacitância pode variar de 4,75μF a 5,25μF.

#### D.2.1 $V_{in} = 20\text{ V}$

A Figura 61 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (126).

$$C_e = \frac{(0,736792\text{A} + 0,738088\text{A}) \cdot (0,106074\text{s} - 0,106063\text{s})}{2 \cdot (20,1138\text{V} - 18,5069\text{V})} = 5,048\mu\text{F} \tag{126}$$

Figura 61 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1 μF com  $V_{in} = 20\text{ V}$

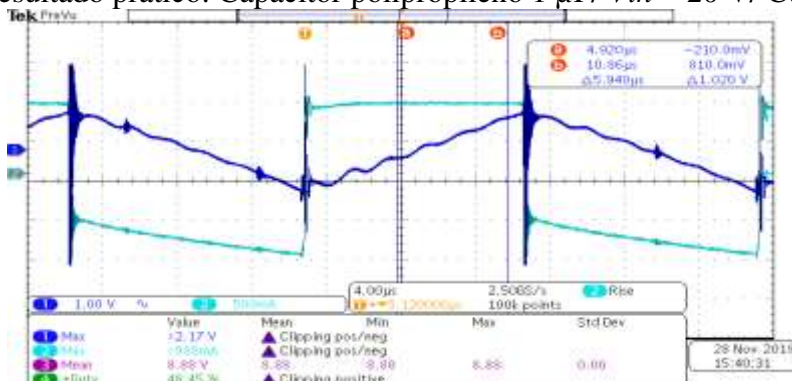


Fonte: Autoria Própria

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 62 e Figura 63. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (127).

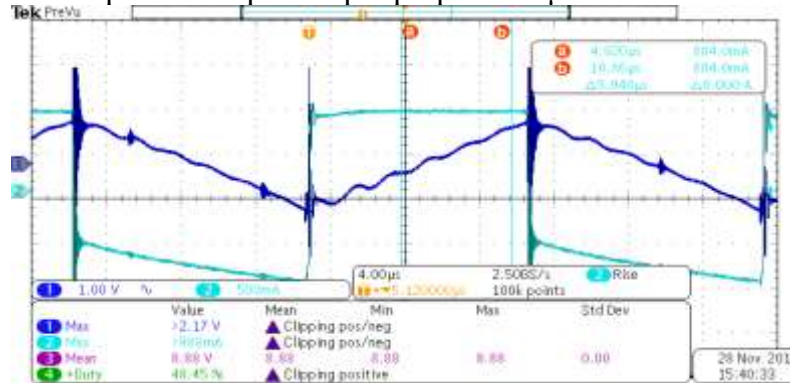
$$C_e = \frac{(0,884\text{A} + 0,884\text{A}) \cdot 5,94\mu\text{s}}{2 \cdot (1,02\text{V})} = 5,148\mu\text{F} \tag{127}$$

Figura 62 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 μF/  $V_{in} = 20\text{ V}$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 63 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 20\text{ V}$ / Cursor de corrente



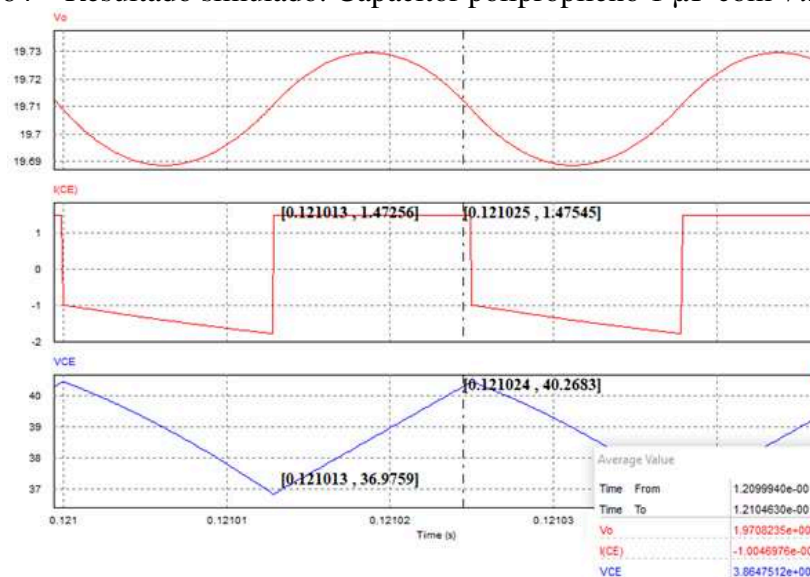
Fonte: Autoria Própria

### D.2.2 $V_{in} = 40\text{ V}$

A Figura 64 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (128).

$$C_e = \frac{(1,47256\text{A} + 1,47545\text{A}) \cdot (0,121025\text{s} - 0,121013\text{s})}{2 \cdot (40,2683\text{V} - 36,9759\text{V})} = 5,372\mu\text{F} \quad (128)$$

Figura 64 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1  $\mu\text{F}$  com  $V_{in} = 40\text{ V}$

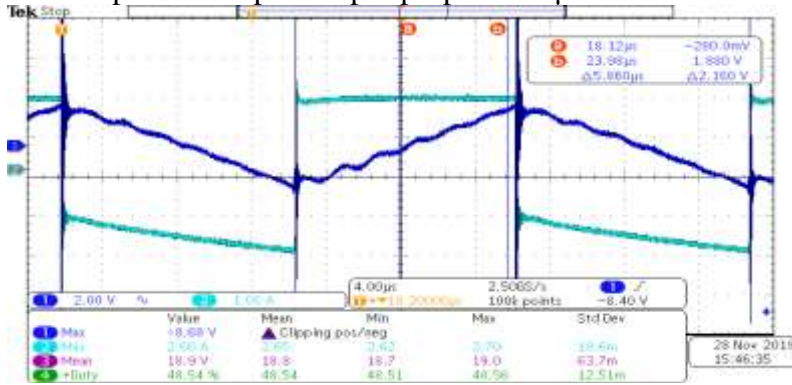


Fonte: Autoria Própria

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 65 e Figura 66. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (129).

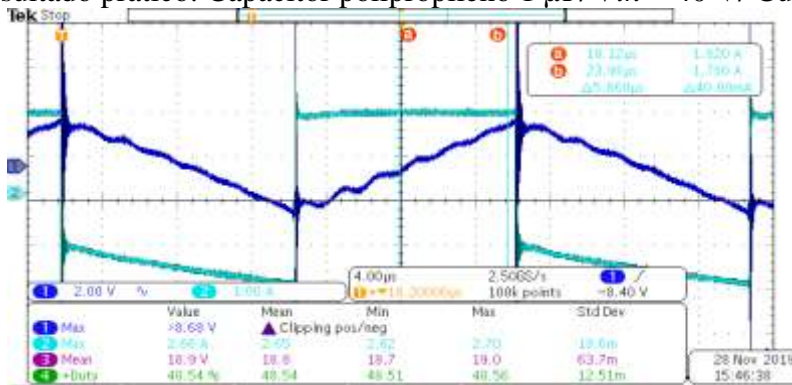
$$C_e = \frac{(1,82\text{A} + 1,78\text{A}) \cdot 5,86\mu\text{s}}{2 \cdot (2,16\text{V})} = 4,883\mu\text{F} \quad (129)$$

Figura 65 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 μF/ Vin = 40 V/ Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 66 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1 μF/ Vin = 40 V/ Cursor de corrente



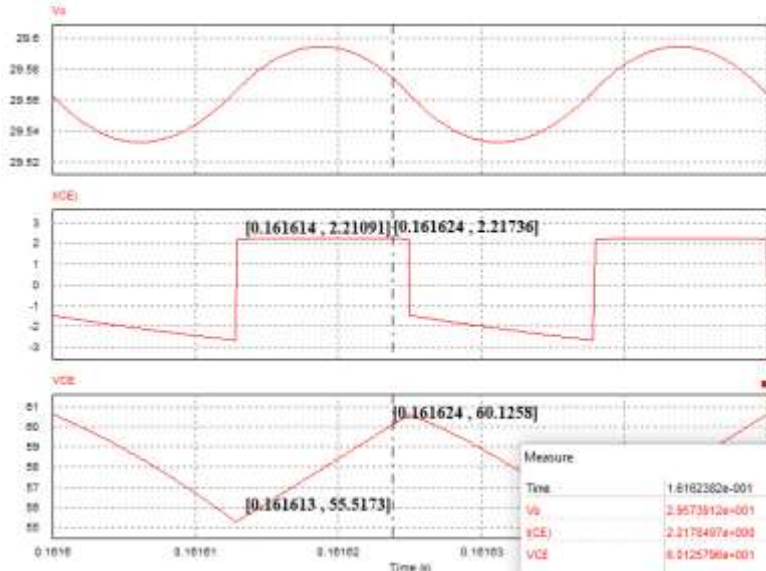
Fonte: Autoria Própria

### D.2.3 Vin = 60 V

A Figura 67 mostra as ondas da tensão de saída, corrente e tensão do capacitor de entrada. A partir da figura pode-se calcular o valor do capacitor, como mostrado em (130).

$$C_e = \frac{(2,21736A + 2,21091A) \cdot (0,161624s - 0,161614s)}{2 \cdot (60,1258V - 55,5173V)} = 4,804 \mu F \quad (130)$$

Figura 67 – Resultado simulado: Capacitor polipropileno 1 μF com Vin = 60 V

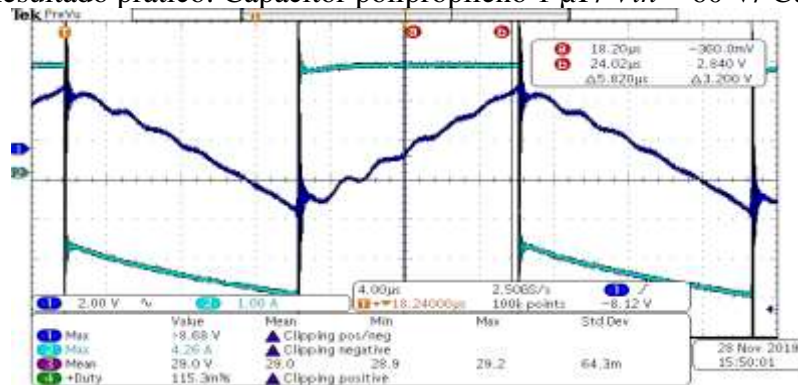


Fonte: Autoria Própria

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foram medidas a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 68 e Figura 69. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (131).

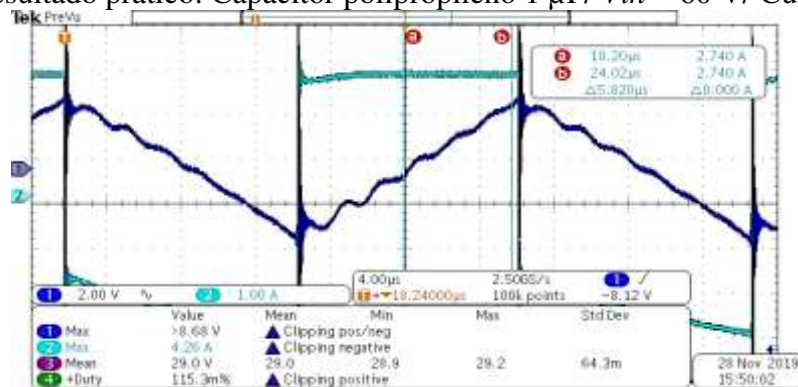
$$C_e = \frac{(2,74\text{A} + 2,74\text{A}) \cdot 5,82\mu\text{s}}{2 \cdot (3,2\text{V})} = 4,983\mu\text{F} \quad (131)$$

Figura 68 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 60\text{ V}$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 69 - Resultado prático: Capacitor polipropileno 1  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 60\text{ V}$ / Cursor de corrente



Fonte: Autoria Própria

### D.3 Capacitor cerâmico 4,7 $\mu\text{F}$

As seções anteriores D.1 e D.2 validaram o método de medição. Pode-se perceber pelos resultados que as capacitâncias calculadas a partir das medições estão dentro da margem de erro da capacitância fornecida pelo fabricante.

Assim, a próxima etapa foi validar o comportamento da capacitância dos capacitores cerâmicos. Para isso, foram utilizados dez capacitores cerâmicos de 4,7  $\mu\text{F}$  associados em paralelo resultando em 47  $\mu\text{F}$ . Como esse capacitor varia sua capacitância com a tensão, segue os dados de referência de tensão e capacitância retirado da folha de dados deste capacitor (Tabela 25).

Tabela 25 – Dados de referência de tensão e capacitância do capacitor cerâmico a ser medido

Tensão (V)	Capacitância (μF)
10	46.90
16	45.12
25	41.06
30	38.25
40	32.42
50	26.60
65	20.60
80	16.25
100	12.34

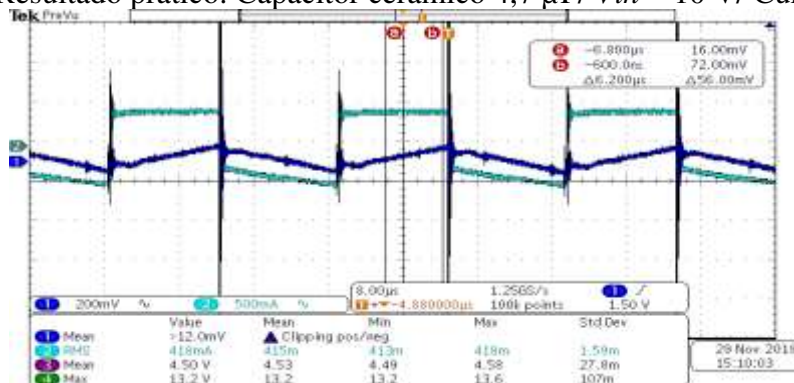
Fonte: [https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part\\_no=CGA9N2X7R2A475K230KA](https://product.tdk.com/en/search/capacitor/ceramic/mlcc/info?part_no=CGA9N2X7R2A475K230KA)

### D.3.1 $V_{in} = 10\text{ V}$

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 70 e Figura 71. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (132).

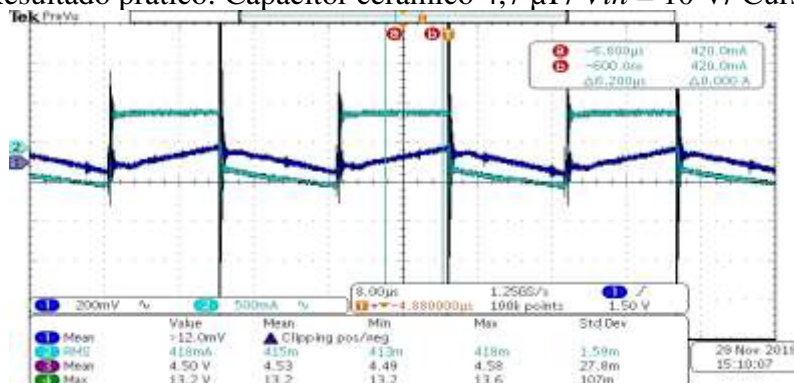
$$C_e = \frac{(0,42\text{A} + 0,42\text{A}) \cdot 6,2\mu\text{s}}{2 \cdot (0,056\text{V})} = 46,5\mu\text{F} \quad (132)$$

Figura 70 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/  $V_{in} = 10\text{ V}$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 71 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/  $V_{in} = 10\text{ V}$ / Cursor de corrente



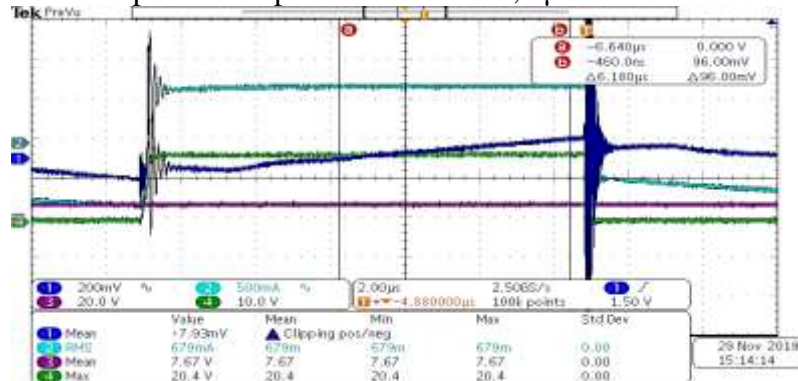
Fonte: Autoria Própria

### D.3.2 $V_{in} = 16\text{ V}$

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 72 e Figura 73. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (133).

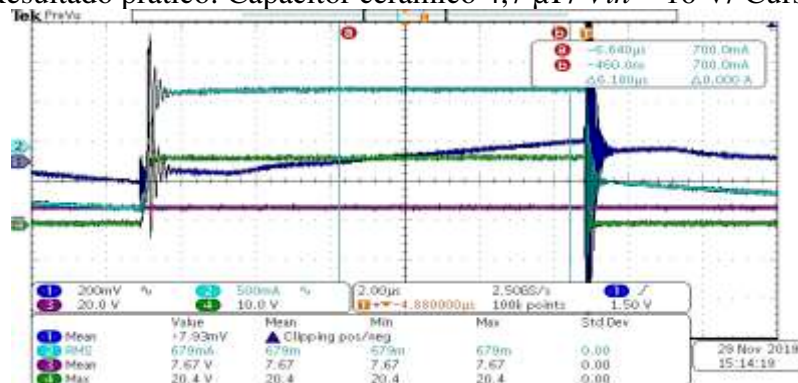
$$C_e = \frac{(0,7A+0,7A) \cdot 6,18\mu s}{2 \cdot (0,096V)} = 45,063\mu F \quad (133)$$

Figura 72 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu$ F/  $V_{in} = 16$  V/ Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 73 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu$ F/  $V_{in} = 16$  V/ Cursor de corrente

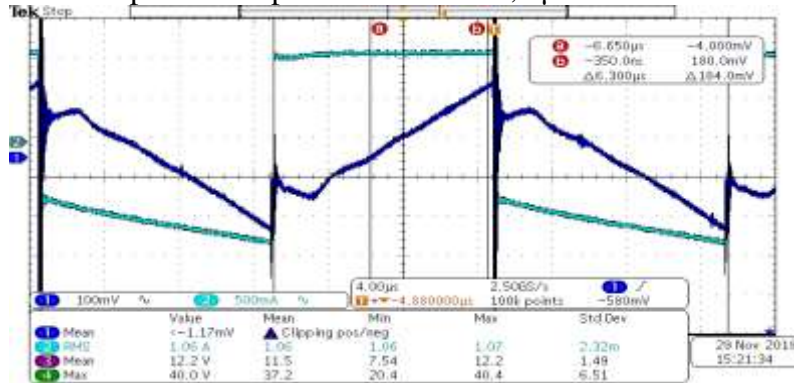


Fonte: Autoria Própria

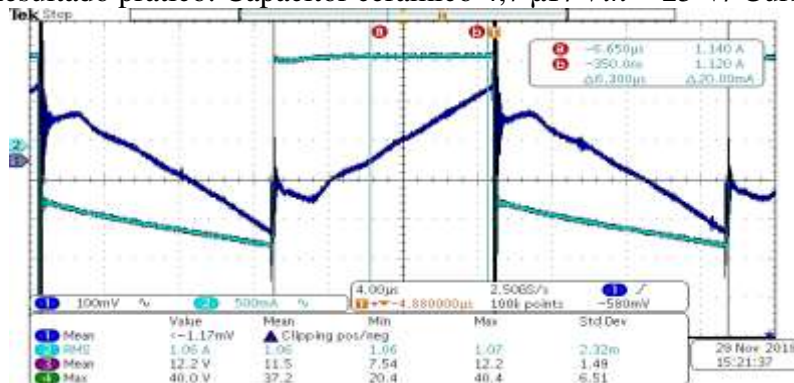
### D.3.3 $V_{in} = 25$ V

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 74 e Figura 75. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (134).

$$C_e = \frac{(1,14A+1,12A) \cdot 6,3\mu s}{2 \cdot (0,184V)} = 38,69\mu F \quad (134)$$

Figura 74 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 25 \text{ V}$ / Cursor de tensão

Fonte: Autoria Própria

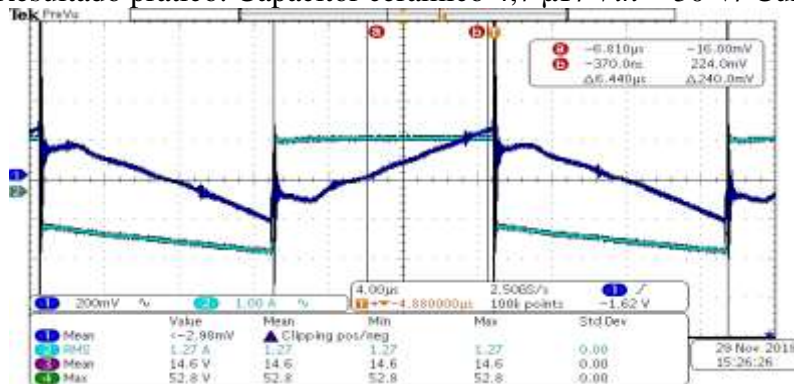
Figura 75 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 25 \text{ V}$ / Cursor de corrente

Fonte: Autoria Própria

D.3.4  $V_{in} = 30 \text{ V}$ 

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 76 e Figura 77. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (135).

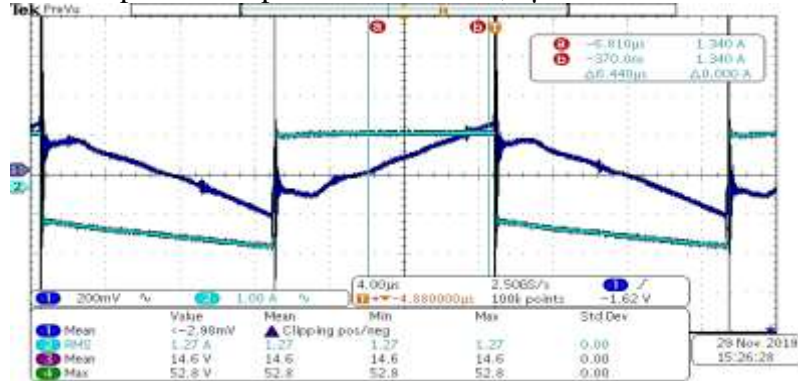
$$C_e = \frac{(1,34\text{A} + 1,34\text{A}) \cdot 6,44\mu\text{s}}{2 \cdot (0,240\text{V})} = 35,957\mu\text{F} \quad (135)$$

Figura 76 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 30 \text{ V}$ / Cursor de tensão

Fonte: Autoria Própria



Figura 77 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 30 V/ Cursor de corrente



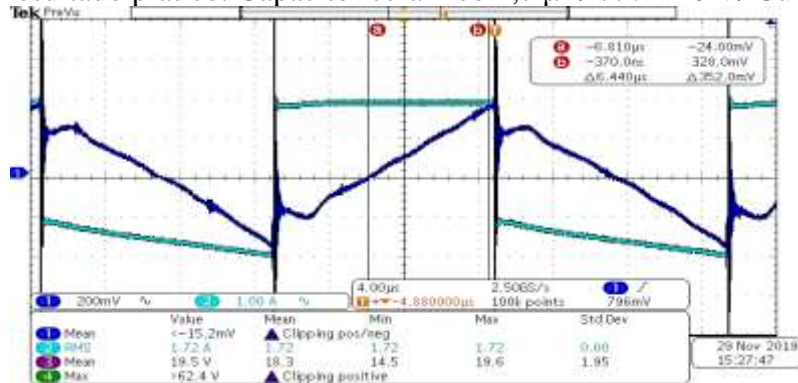
Fonte: Autoria Própria

D.3.5 Vin = 40 V

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 78 e Figura 79. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (136).

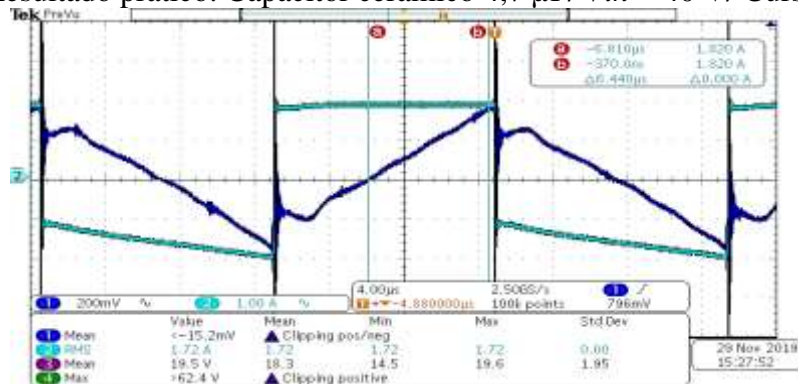
$$C_e = \frac{(1,82A+1,82A) \cdot 6,44\mu s}{2 \cdot (0,352V)} = 33,298 \mu F \tag{136}$$

Figura 78 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 40 V/ Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 79 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 40 V/ Cursor de corrente



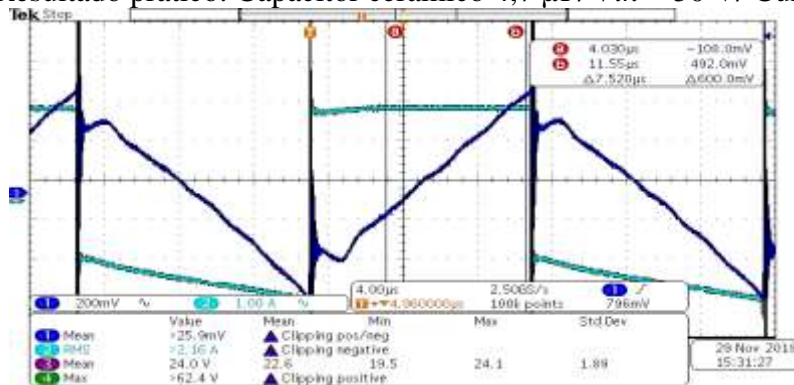
Fonte: Autoria Própria

D.3.6 Vin = 50 V

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 80 e Figura 81. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (137).

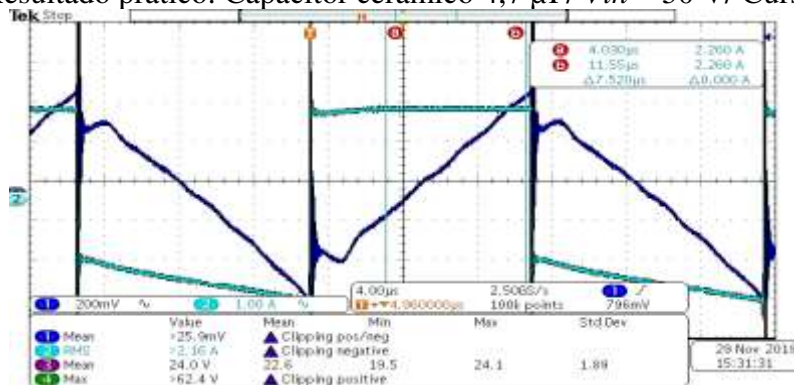
$$C_e = \frac{(2,26A+2,26A) \cdot 7,52\mu s}{2 \cdot (0,600V)} = 28,325 \mu F \quad (137)$$

Figura 80 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu F$ /  $V_{in} = 50 V$ / Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 81 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu F$ /  $V_{in} = 50 V$ / Cursor de corrente



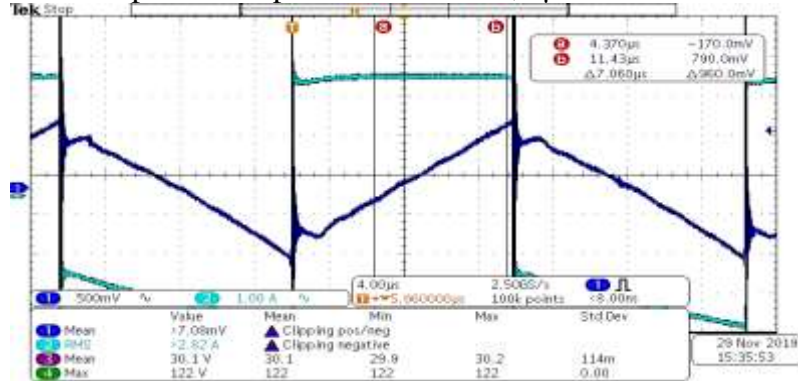
Fonte: Autoria Própria

### D.3.7 $V_{in} = 65 V$

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 82 e Figura 83. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (138).

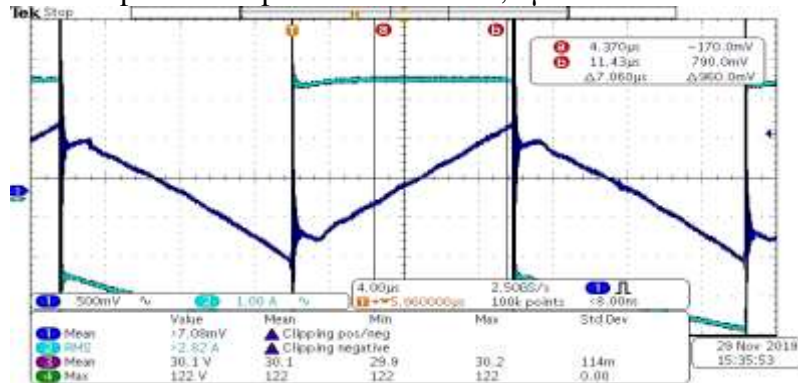
$$C_e = \frac{(2,9A+2,94A) \cdot 7,06\mu s}{2 \cdot (0,960V)} = 21,474 \mu F \quad (138)$$

Figura 82 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 65 V/ Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

Figura 83 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 65 V/ Cursor de corrente



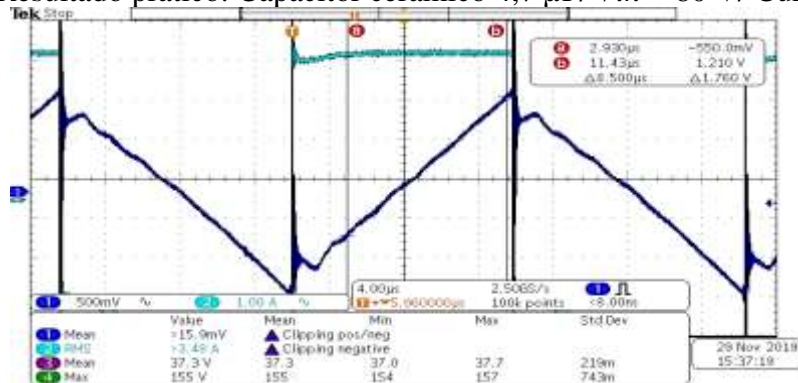
Fonte: Autoria Própria

D.3.8 Vin = 80 V

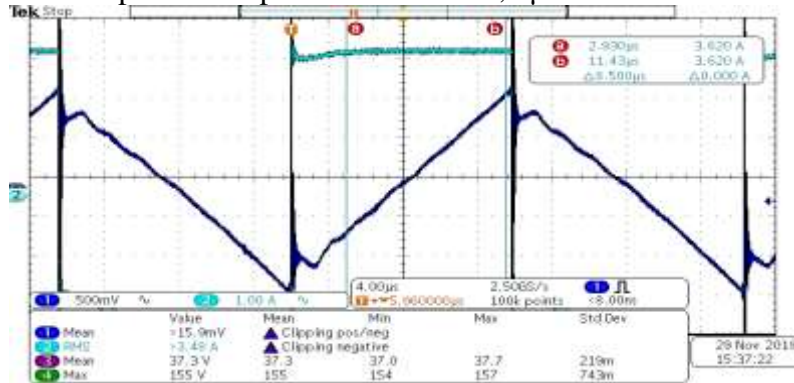
Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 84 e Figura 85. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (139).

$$C_e = \frac{(3,62A+3,62A) \cdot 8,5\mu s}{2 \cdot (1,76V)} = 17,483 \mu F \tag{139}$$

Figura 84 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7 μF/ Vin = 80 V/ Cursor de tensão



Fonte: Autoria Própria

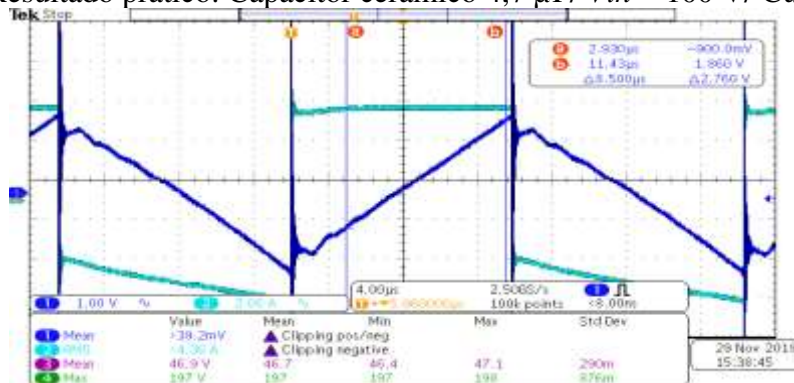
Figura 85 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 80\text{ V}$ / Cursor de corrente

Fonte: Autoria Própria

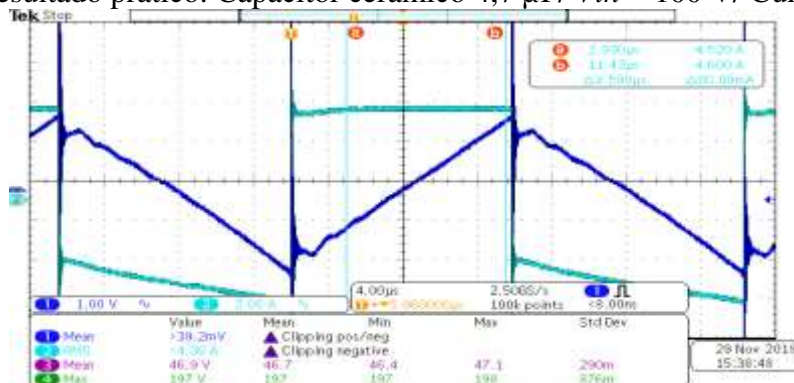
D.3.9  $V_{in} = 100\text{ V}$ 

Utilizando a função de cursor do osciloscópio foi medido a tensão e corrente do capacitor de entrada. Os resultados são mostrados nas Figura 86 e Figura 87. A partir desses valores medidos, foi calculado a capacitância do capacitor de entrada, como mostrado em (140).

$$C_e = \frac{(4,6\text{A} + 4,52\text{A}) \cdot 8,5\mu\text{s}}{2 \cdot (2,76\text{V})} = 14,043\ \mu\text{F} \quad (140)$$

Figura 86 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 100\text{ V}$ / Cursor de tensão

Fonte: Autoria Própria

Figura 87 - Resultado prático: Capacitor cerâmico 4,7  $\mu\text{F}$ /  $V_{in} = 100\text{ V}$ / Cursor de corrente

Fonte: Autoria Própria

## APÊNDICE E – Memória de cálculo do retificador

### E.1 Placa 1 – Capacitor variável utilizando capacitores *TDK® CGA9N2X7R2A475K230KA*

As tabelas a seguir mostram os resultados das equações da seção 6.2 quando utilizado o capacitor variável montado na Placa 1 no projeto apresentado na seção 6.3.

Tabela 26 – Módulo da Reatância Capacitiva do Capacitor de Entrada (X)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	99999
0	2,35E-05	112,88	112,88	112,88	112,88	112,88	112,88
2	2,38E-05	111,69	111,69	111,69	111,69	111,69	111,69
4	2,37E-05	111,71	111,71	111,71	111,71	111,71	111,71
8	2,38E-05	111,41	111,41	111,41	111,41	111,41	111,41
12,6	2,37E-05	111,73	111,73	111,73	111,73	111,73	111,73
20	2,35E-05	113,12	113,12	113,12	113,12	113,12	113,12
32	2,26E-05	117,58	117,58	117,58	117,58	117,58	117,58
50	2,05E-05	129,21	129,21	129,21	129,21	129,21	129,21
60	1,91E-05	138,70	138,70	138,70	138,70	138,70	138,70
80	1,62E-05	163,64	163,64	163,64	163,64	163,64	163,64
100	1,33E-05	199,44	199,44	199,44	199,44	199,44	199,44
130	1,03E-05	257,53	257,53	257,53	257,53	257,53	257,53
160	8,13E-06	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47
200	6,17E-06	429,92	429,92	429,92	429,92	429,92	429,92

Fonte: Autoria Própria

Tabela 27 – Tensão de Saída –  $V_o$  - (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,80	52,90	105,50	215,80	99999
0	2,35E-05	1,23	2,30	4,64	7,54	11,10	20,21
2	2,38E-05	1,24	2,32	4,68	7,59	11,15	20,21
4	2,37E-05	1,24	2,32	4,68	7,59	11,15	20,21
8	2,38E-05	1,25	2,33	4,69	7,60	11,16	20,21
12,6	2,37E-05	1,24	2,32	4,68	7,59	11,15	20,21
20	2,35E-05	1,23	2,30	4,64	7,53	11,09	20,21
32	2,26E-05	1,18	2,22	4,50	7,35	10,89	20,21
50	2,05E-05	1,08	2,04	4,18	6,91	10,42	20,21
60	1,91E-05	1,01	1,91	3,95	6,59	10,06	20,21
80	1,62E-05	0,87	1,65	3,45	5,88	9,23	20,21
100	1,33E-05	0,72	1,37	2,92	5,09	8,24	20,21
130	1,03E-05	0,56	1,08	2,34	4,18	7,03	20,21
160	8,13E-06	0,44	0,86	1,89	3,45	5,99	20,21
200	6,17E-06	0,34	0,66	1,47	2,73	4,90	20,21

Fonte: Autoria Própria

Tabela 28 – Ondulação ( $r$ )

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		13,10	26,20	52,40	104,80	209,60	99999
0	2,35E-05	6,18E-02	3,78E-02	1,98E-02	1,13E-02	6,28E-03	4,22E-08
2	2,38E-05	6,20E-02	3,79E-02	1,98E-02	1,14E-02	6,29E-03	4,22E-08
4	2,37E-05	6,20E-02	3,79E-02	1,98E-02	1,14E-02	6,29E-03	4,22E-08
8	2,38E-05	6,21E-02	3,79E-02	1,98E-02	1,14E-02	6,29E-03	4,22E-08
12,6	2,37E-05	6,20E-02	3,79E-02	1,98E-02	1,14E-02	6,29E-03	4,22E-08
20	2,35E-05	6,18E-02	3,78E-02	1,98E-02	1,13E-02	6,27E-03	4,22E-08
32	2,26E-05	6,11E-02	3,74E-02	1,96E-02	1,13E-02	6,23E-03	4,21E-08
50	2,05E-05	5,93E-02	3,65E-02	1,92E-02	1,11E-02	6,14E-03	4,19E-08
60	1,91E-05	5,79E-02	3,58E-02	1,89E-02	1,09E-02	6,07E-03	4,17E-08
80	1,62E-05	5,48E-02	3,42E-02	1,82E-02	1,06E-02	5,90E-03	4,13E-08
100	1,33E-05	5,10E-02	3,23E-02	1,74E-02	1,02E-02	5,70E-03	4,09E-08
130	1,03E-05	4,61E-02	2,98E-02	1,64E-02	9,63E-03	5,44E-03	4,03E-08
160	8,13E-06	4,16E-02	2,76E-02	1,54E-02	9,14E-03	5,20E-03	3,98E-08
200	6,17E-06	3,63E-02	2,49E-02	1,42E-02	8,57E-03	4,92E-03	3,92E-08

Fonte: Autoria Própria

Tabela 29 – Tensão de Saída Corrigida –  $V_{oc}$  – (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		13,10	26,20	52,40	104,80	209,60	99999
0	2,35E-05	1,193	2,260	4,599	7,498	11,061	20,213
2	2,38E-05	1,205	2,281	4,636	7,547	11,114	20,213
4	2,37E-05	1,205	2,280	4,636	7,546	11,113	20,213
8	2,38E-05	1,208	2,286	4,645	7,559	11,127	20,213
12,6	2,37E-05	1,204	2,280	4,635	7,545	11,112	20,213
20	2,35E-05	1,191	2,255	4,591	7,488	11,051	20,213
32	2,26E-05	1,149	2,180	4,456	7,307	10,858	20,213
50	2,05E-05	1,052	2,004	4,139	6,875	10,385	20,213
60	1,91E-05	0,984	1,881	3,912	6,559	10,028	20,213
80	1,62E-05	0,842	1,619	3,418	5,851	9,198	20,213
100	1,33E-05	0,697	1,349	2,895	5,066	8,221	20,213
130	1,03E-05	0,546	1,062	2,318	4,161	7,013	20,213
160	8,13E-06	0,434	0,849	1,876	3,433	5,971	20,213
200	6,17E-06	0,332	0,652	1,458	2,719	4,883	20,213

Fonte: Autoria Própria

Tabela 30 – Variação da Tensão de Saída -  $\Delta V_o$  – (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		13,10	26,20	52,40	104,80	209,60	999999
0	2,35E-05	0,0738	0,0854	0,0909	0,0851	0,0694	8,52E-07
2	2,38E-05	0,0748	0,0864	0,0919	0,0858	0,0699	8,53E-07
4	2,37E-05	0,0747	0,0864	0,0919	0,0858	0,0699	8,53E-07
8	2,38E-05	0,0750	0,0866	0,0921	0,0860	0,0700	8,53E-07
12,6	2,37E-05	0,0747	0,0863	0,0918	0,0858	0,0698	8,53E-07
20	2,35E-05	0,0736	0,0852	0,0907	0,0849	0,0693	8,52E-07
32	2,26E-05	0,0701	0,0815	0,0874	0,0823	0,0677	8,50E-07
50	2,05E-05	0,0623	0,0731	0,0795	0,0761	0,0637	8,46E-07
60	1,91E-05	0,0570	0,0673	0,0740	0,0716	0,0608	8,43E-07
80	1,62E-05	0,0461	0,0554	0,0623	0,0619	0,0542	8,36E-07
100	1,33E-05	0,0356	0,0436	0,0504	0,0515	0,0468	8,27E-07
130	1,03E-05	0,0252	0,0317	0,0379	0,0401	0,0381	8,16E-07
160	8,13E-06	0,0191	0,0244	0,0288	0,0314	0,0311	8,05E-07
200	6,17E-06	0,0129	0,0170	0,0207	0,0233	0,0240	7,93E-07

Fonte: Autoria Própria

## E.2 Placa 2 – Capacitor variável utilizando capacitores *Kemet*<sup>®</sup> C1206C106K4RAC7800

As tabelas a seguir mostram os resultados das equações da seção 6.2 quando utilizado o capacitor variável montado na Placa 2 no projeto apresentado na seção 6.3.

Tabela 31 - Módulo da Reatância Capacitiva do Capacitor de Entrada (X)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	10E8
0	1,00E-04	26,53	26,53	26,53	26,53	26,53	26,53
3,84	9,71E-05	27,33	27,33	27,33	27,33	27,33	27,33
4,16	9,65E-05	27,48	27,48	27,48	27,48	27,48	27,48
5,76	9,34E-05	28,41	28,41	28,41	28,41	28,41	28,41
6,08	9,26E-05	28,64	28,64	28,64	28,64	28,64	28,64
8	8,72E-05	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42
9,92	8,03E-05	33,03	33,03	33,03	33,03	33,03	33,03
10,24	7,81E-05	33,96	33,96	33,96	33,96	33,96	33,96
11,84	6,76E-05	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26
12,16	6,58E-05	40,32	40,32	40,32	40,32	40,32	40,32
13,76	5,81E-05	45,62	45,62	45,62	45,62	45,62	45,62
14,08	5,68E-05	46,68	46,68	46,68	46,68	46,68	46,68
16	5,00E-05	53,05	53,05	53,05	53,05	53,05	53,05
17,92	4,46E-05	59,42	59,42	59,42	59,42	59,42	59,42
18,24	4,39E-05	60,48	60,48	60,48	60,48	60,48	60,48
19,84	4,03E-05	65,79	65,79	65,79	65,79	65,79	65,79
20,16	3,96E-05	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04
21,76	3,68E-05	72,16	72,16	72,16	72,16	72,16	72,16
22,08	3,62E-05	73,22	73,22	73,22	73,22	73,22	73,22
24	3,33E-05	79,59	79,59	79,59	79,59	79,59	79,59
25,92	3,09E-05	85,96	85,96	85,96	85,96	85,96	85,96
26,24	3,05E-05	87,00	87,00	87,00	87,00	87,00	87,00
27,84	2,87E-05	92,30	92,30	92,30	92,30	92,30	92,30
28,16	2,84E-05	93,37	93,37	93,37	93,37	93,37	93,37
29,76	2,69E-05	98,68	98,68	98,68	98,68	98,68	98,68
30,08	2,66E-05	99,72	99,72	99,72	99,72	99,72	99,72
31,68	2,53E-05	105,05	105,05	105,05	105,05	105,05	105,05

Fonte: Autoria Própria



Tabela 32 - Tensão de Saída –  $V_o$  - (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	10E8
0	1,00E-04	4,37	7,09	11,33	14,56	17,08	20,21
3,84	9,71E-05	4,27	6,95	11,18	14,43	17,00	20,21
4,16	9,65E-05	4,25	6,93	11,15	14,41	16,98	20,21
5,76	9,34E-05	4,14	6,77	10,98	14,27	16,89	20,21
6,08	9,26E-05	4,11	6,74	10,94	14,24	16,87	20,21
8	8,72E-05	3,92	6,47	10,64	13,98	16,70	20,21
9,92	8,03E-05	3,67	6,11	10,22	13,62	16,45	20,21
10,24	7,81E-05	3,59	6,00	10,08	13,50	16,37	20,21
11,84	6,76E-05	3,18	5,40	9,35	12,83	15,89	20,21
12,16	6,58E-05	3,11	5,30	9,22	12,71	15,80	20,21
13,76	5,81E-05	2,80	4,83	8,60	12,11	15,36	20,21
14,08	5,68E-05	2,74	4,75	8,49	12,00	15,28	20,21
16	5,00E-05	2,45	4,30	7,87	11,37	14,78	20,21
17,92	4,46E-05	2,22	3,93	7,33	10,81	14,32	20,21
18,24	4,39E-05	2,18	3,87	7,25	10,72	14,25	20,21
19,84	4,03E-05	2,02	3,61	6,86	10,29	13,89	20,21
20,16	3,96E-05	1,99	3,56	6,78	10,20	13,81	20,21
21,76	3,68E-05	1,86	3,35	6,45	9,82	13,48	20,21
22,08	3,62E-05	1,84	3,31	6,38	9,75	13,41	20,21
24	3,33E-05	1,70	3,08	6,03	9,33	13,03	20,21
25,92	3,09E-05	1,59	2,89	5,71	8,95	12,67	20,21
26,24	3,05E-05	1,57	2,86	5,66	8,89	12,62	20,21
27,84	2,87E-05	1,49	2,72	5,42	8,59	12,33	20,21
28,16	2,84E-05	1,47	2,69	5,37	8,54	12,28	20,21
29,76	2,69E-05	1,40	2,56	5,16	8,26	12,01	20,21
30,08	2,66E-05	1,38	2,54	5,12	8,21	11,96	20,21
31,68	2,53E-05	1,32	2,43	4,92	7,96	11,70	20,21

Fonte: Autoria Própria

Tabela 33 - Ondulação ( $r$ )

Tensão de Controle Vc (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	10E8
0	1,00E-04	0,0895	0,0523	0,0257	0,0142	0,0074	4,53E-08
3,84	9,71E-05	0,0889	0,0520	0,0256	0,0141	0,0074	4,53E-08
4,16	9,65E-05	0,0888	0,0519	0,0255	0,0141	0,0074	4,53E-08
5,76	9,34E-05	0,0882	0,0516	0,0254	0,0140	0,0074	4,52E-08
6,08	9,26E-05	0,0880	0,0515	0,0254	0,0140	0,0073	4,52E-08
8	8,72E-05	0,0868	0,0509	0,0251	0,0139	0,0073	4,50E-08
9,92	8,03E-05	0,0853	0,0501	0,0248	0,0137	0,0072	4,49E-08
10,24	7,81E-05	0,0848	0,0499	0,0247	0,0137	0,0072	4,48E-08
11,84	6,76E-05	0,0820	0,0484	0,0241	0,0134	0,0070	4,45E-08
12,16	6,58E-05	0,0815	0,0482	0,0240	0,0133	0,0070	4,44E-08
13,76	5,81E-05	0,0791	0,0470	0,0235	0,0131	0,0069	4,41E-08
14,08	5,68E-05	0,0787	0,0468	0,0234	0,0130	0,0069	4,41E-08
16	5,00E-05	0,0762	0,0455	0,0228	0,0127	0,0067	4,38E-08
17,92	4,46E-05	0,0741	0,0444	0,0224	0,0125	0,0066	4,36E-08
18,24	4,39E-05	0,0737	0,0442	0,0223	0,0125	0,0066	4,35E-08
19,84	4,03E-05	0,0721	0,0434	0,0219	0,0123	0,0065	4,33E-08
20,16	3,96E-05	0,0718	0,0432	0,0219	0,0123	0,0065	4,33E-08
21,76	3,68E-05	0,0704	0,0425	0,0216	0,0121	0,0064	4,31E-08
22,08	3,62E-05	0,0701	0,0424	0,0215	0,0121	0,0064	4,31E-08
24	3,33E-05	0,0685	0,0416	0,0212	0,0119	0,0064	4,29E-08
25,92	3,09E-05	0,0670	0,0408	0,0208	0,0118	0,0063	4,28E-08
26,24	3,05E-05	0,0668	0,0407	0,0208	0,0117	0,0063	4,27E-08
27,84	2,87E-05	0,0657	0,0401	0,0205	0,0116	0,0062	4,26E-08
28,16	2,84E-05	0,0655	0,0400	0,0205	0,0116	0,0062	4,26E-08
29,76	2,69E-05	0,0644	0,0395	0,0203	0,0115	0,0061	4,25E-08
30,08	2,66E-05	0,0642	0,0394	0,0202	0,0115	0,0061	4,24E-08
31,68	2,53E-05	0,0632	0,0389	0,0200	0,0113	0,0061	4,23E-08

Fonte: Autoria Própria

Tabela 34 - Tensão de Saída Corrigida –  $V_{oc}$  – (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	10E8
0	1,00E-04	4,177	6,903	11,180	14,453	17,014	20,213
3,84	9,71E-05	4,081	6,770	11,034	14,331	16,934	20,213
4,16	9,65E-05	4,064	6,747	11,008	14,310	16,920	20,213
5,76	9,34E-05	3,959	6,600	10,843	14,172	16,829	20,213
6,08	9,26E-05	3,934	6,565	10,803	14,138	16,806	20,213
8	8,72E-05	3,751	6,306	10,506	13,884	16,636	20,213
9,92	8,03E-05	3,511	5,962	10,098	13,528	16,393	20,213
10,24	7,81E-05	3,433	5,848	9,960	13,405	16,307	20,213
11,84	6,76E-05	3,047	5,273	9,240	12,746	15,838	20,213
12,16	6,58E-05	2,980	5,171	9,108	12,622	15,747	20,213
13,76	5,81E-05	2,684	4,716	8,502	12,035	15,308	20,213
14,08	5,68E-05	2,632	4,635	8,390	11,925	15,224	20,213
16	5,00E-05	2,358	4,200	7,777	11,300	14,734	20,213
17,92	4,46E-05	2,135	3,839	7,248	10,738	14,274	20,213
18,24	4,39E-05	2,102	3,785	7,167	10,650	14,201	20,213
19,84	4,03E-05	1,951	3,536	6,786	10,229	13,843	20,213
20,16	3,96E-05	1,919	3,482	6,702	10,134	13,761	20,213
21,76	3,68E-05	1,796	3,277	6,379	9,765	13,436	20,213
22,08	3,62E-05	1,773	3,237	6,316	9,693	13,371	20,213
24	3,33E-05	1,644	3,019	5,962	9,276	12,991	20,213
25,92	3,09E-05	1,533	2,828	5,646	8,893	12,633	20,213
26,24	3,05E-05	1,517	2,799	5,598	8,834	12,576	20,213
27,84	2,87E-05	1,437	2,661	5,363	8,543	12,295	20,213
28,16	2,84E-05	1,422	2,635	5,318	8,486	12,239	20,213
29,76	2,69E-05	1,351	2,512	5,105	8,216	11,972	20,213
30,08	2,66E-05	1,338	2,489	5,066	8,166	11,921	20,213
31,68	2,53E-05	1,275	2,378	4,872	7,915	11,667	20,213

Fonte: Autoria Própria

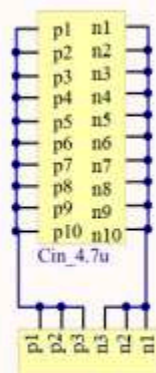
Tabela 35 - Variação da Tensão de Saída -  $\Delta V_o$  - (V)

Tensão de Controle $V_c$ (V)	Capacitância (F)	Carga ( $\Omega$ )					
		11,50	22,50	53,10	107,20	226,90	10E8
0	1,00E-04	0,3736	0,3608	0,2873	0,2047	0,1262	9,16E-07
3,84	9,71E-05	0,3627	0,3519	0,2821	0,2021	0,1251	9,15E-07
4,16	9,65E-05	0,3608	0,3503	0,2812	0,2017	0,1249	9,15E-07
5,76	9,34E-05	0,3490	0,3405	0,2755	0,1987	0,1237	9,13E-07
6,08	9,26E-05	0,3462	0,3382	0,2742	0,1980	0,1234	9,13E-07
8	8,72E-05	0,3258	0,3212	0,2640	0,1928	0,1212	9,10E-07
9,92	8,03E-05	0,2995	0,2989	0,2503	0,1856	0,1181	9,07E-07
10,24	7,81E-05	0,2910	0,2916	0,2457	0,1831	0,1171	9,05E-07
11,84	6,76E-05	0,2498	0,2554	0,2224	0,1703	0,1115	8,99E-07
12,16	6,58E-05	0,2428	0,2492	0,2183	0,1680	0,1104	8,98E-07
13,76	5,81E-05	0,2124	0,2216	0,1994	0,1571	0,1055	8,92E-07
14,08	5,68E-05	0,2071	0,2167	0,1960	0,1551	0,1046	8,91E-07
16	5,00E-05	0,1798	0,1911	0,1776	0,1440	0,0994	8,86E-07
17,92	4,46E-05	0,1582	0,1705	0,1621	0,1344	0,0947	8,81E-07
18,24	4,39E-05	0,1550	0,1674	0,1597	0,1329	0,0940	8,80E-07
19,84	4,03E-05	0,1407	0,1535	0,1489	0,1259	0,0905	8,76E-07
20,16	3,96E-05	0,1377	0,1505	0,1465	0,1243	0,0897	8,75E-07
21,76	3,68E-05	0,1264	0,1393	0,1375	0,1183	0,0867	8,72E-07
22,08	3,62E-05	0,1243	0,1372	0,1358	0,1172	0,0860	8,71E-07
24	3,33E-05	0,1127	0,1255	0,1261	0,1105	0,0826	8,68E-07
25,92	3,09E-05	0,1028	0,1154	0,1177	0,1046	0,0793	8,64E-07
26,24	3,05E-05	0,1013	0,1139	0,1164	0,1037	0,0788	8,64E-07
27,84	2,87E-05	0,0944	0,1067	0,1102	0,0992	0,0764	8,61E-07
28,16	2,84E-05	0,0931	0,1054	0,1090	0,0984	0,0759	8,61E-07
29,76	2,69E-05	0,0870	0,0991	0,1035	0,0943	0,0736	8,58E-07
30,08	2,66E-05	0,0859	0,0980	0,1024	0,0935	0,0732	8,58E-07
31,68	2,53E-05	0,0806	0,0924	0,0975	0,0898	0,0710	8,55E-07

Fonte: Autoria Própria

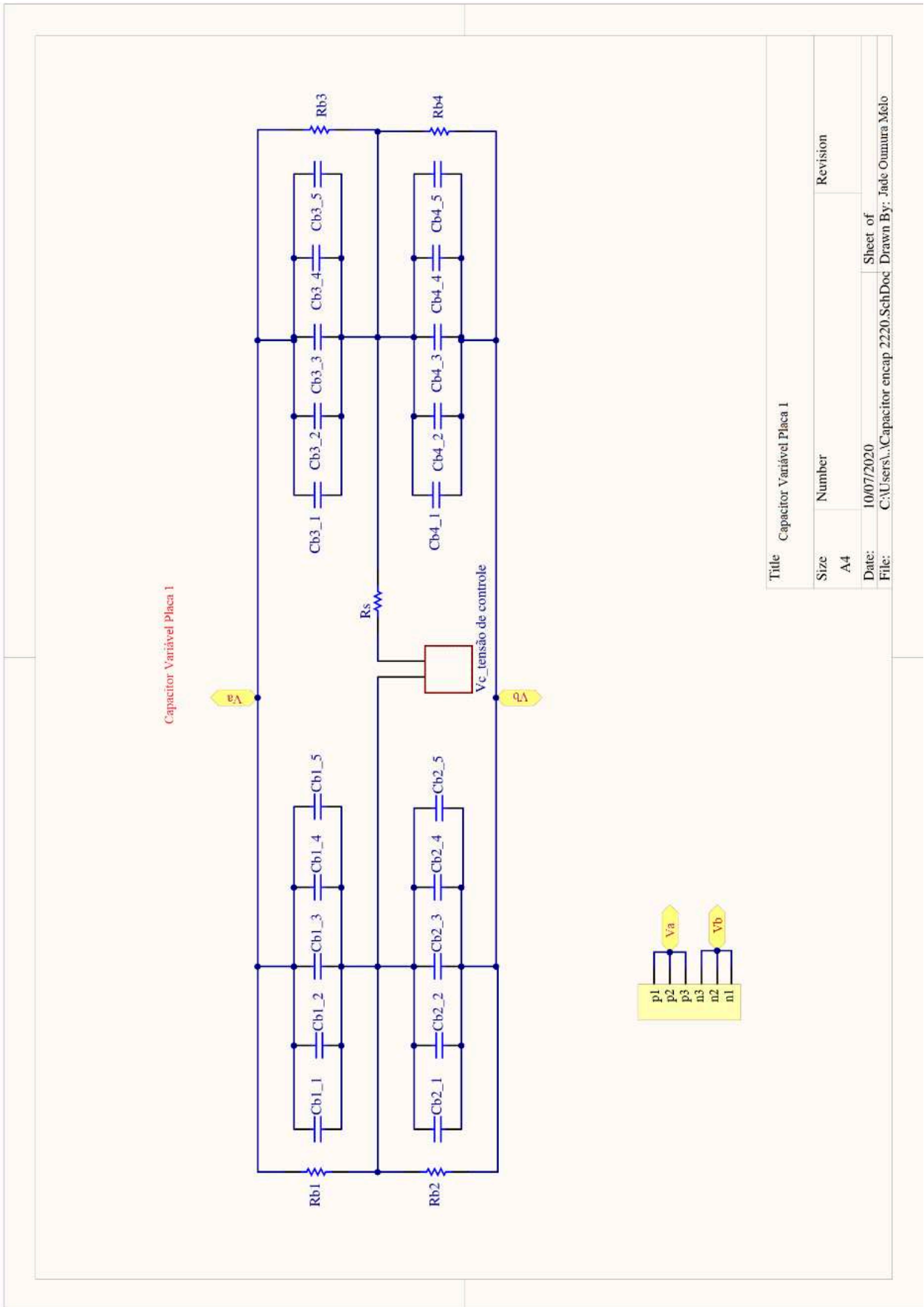


**APÊNDICE G – Diagrama Esquemático da placa para 10 capacitores associados em paralelo (tamanho 2220)**



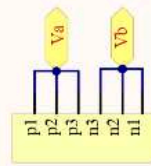
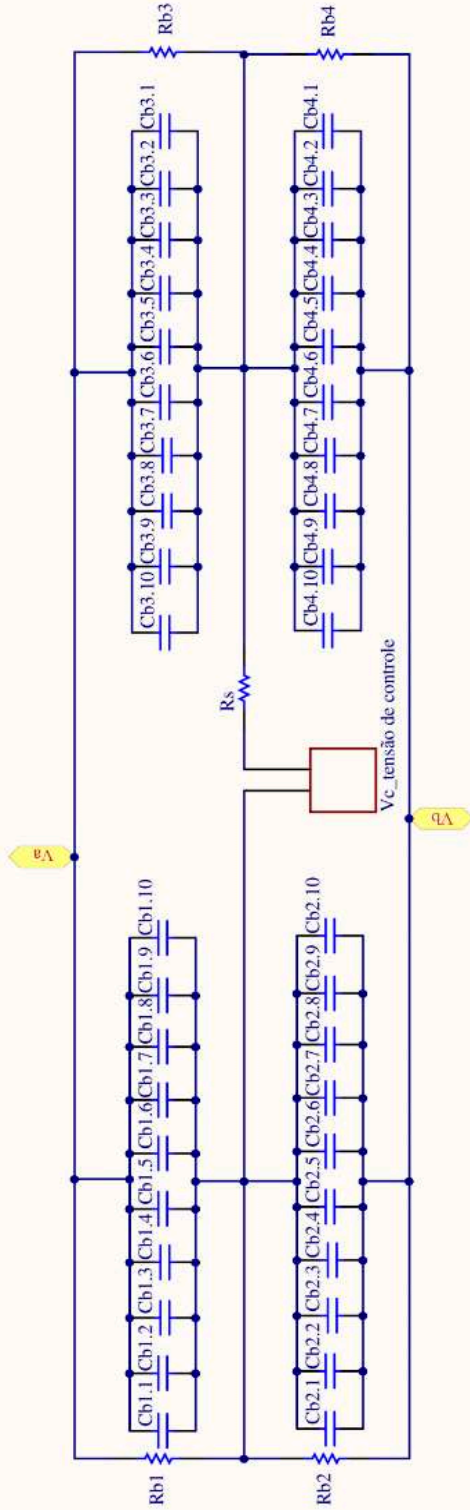
Title		
Placa para dez capacitores em paralelo (tamanho 2220)		
Size	Number	Revision
A5		
Date:	10/07/2020	Sheet of
File:	C:\Users\...Capacitor encap 2220.SchDoc	Drawn By: Jade Oumtra Melo

## APÊNDICE H – Diagrama Esquemático do capacitor variável Placa 1



APÊNDICE I – Diagrama Esquemático do capacitor variável Placa 2

Capacitor Variável (Placa 2)



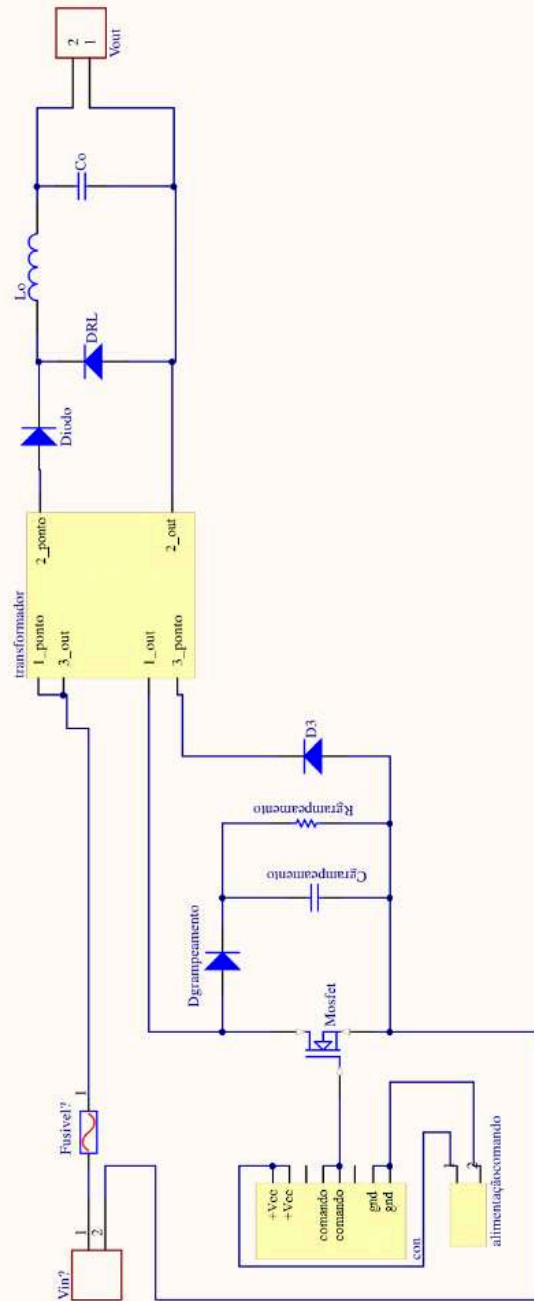
Title Capacitor Variável (Placa 2)

Size A4  
Number  
Revision

Date: 10/07/2020  
File: C:\Users\...\Capacitor encap 2220.SchDoc  
Sheet of  
Drawn By: Jade Ommura Melo



## APÊNDICE J – Diagrama Esquemático do Conversor Forward



Title: Conversor Forward

Size: A4  
Number: Revision:

Date: 13/07/2020  
File: C:\Users\...Forward.SchDoc  
Sheet of: Drawn By: Jade Oumura Melo



