

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

VANDERSON DAMIÃO PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RETIFICADORES
MONOFÁSICOS BOOST E SEPIC OPERANDO NO MODO DE
CONDUÇÃO DESCONTÍNUO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2016**

VANDERSON DAMIÃO PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RETIFICADORES
MONOFÁSICOS BOOST E SEPIC OPERANDO NO MODO DE
CONDUÇÃO DESCONTÍNUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

PONTA GROSSA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RETIFICADORES MONOFÁSICOS BOOST E SEPIC OPERANDO NO MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO

Desenvolvido por:

VANDERSON DAMIÃO PEREIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 24 de novembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font
Prof. Orientador

Prof. Dr. Hélio Voltolini
Membro titular

Prof. Dr. Márcio Mendes Casaro
Membro titular

Dedico este trabalho à minha família,
principalmente aos meus pais que, com
muito amor e carinho, não mediram
esforços para que eu cumprisse mais esta
etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus que todos os dias, principalmente nos mais difíceis, sempre esteve ao meu lado, guiando o meu coração, dando-me saúde, força e coragem para superar as dificuldades.

Aos meus pais que são meus heróis e demais familiares que, com muito amor me deram apoio e incentivo em todo momento, especialmente nas horas mais difíceis, de desânimo e cansaço.

Aos verdadeiros amigos que sempre estiveram ao meu lado, compartilhando os momentos de alegria e tristeza. Não importando a distância e o tempo, vocês sempre estarão presentes em meu coração.

Ao meu orientador que confiou em mim, sempre me recebeu com atenção, compartilhando comigo um pouco de seu conhecimento e experiência, me direcionando pelos melhores caminhos, permitindo a realização deste trabalho.

A todos os professores e demais funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que foram tão importantes durante minha vida acadêmica, contribuindo não somente para o conhecimento técnico e científico, mas com ensinamentos para vida toda.

Temos de fazer o melhor que podemos.
Esta é a nossa sagrada responsabilidade
humana.
Albert Einstein

RESUMO

PEREIRA, Vanderson Damião. **Análise comparativa entre os retificadores monofásicos Boost e SEPIC operando no modo de condução descontinuo.** 2016. 109. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

O trabalho apresenta uma análise comparativa entre os resultados experimentais, visando à correção do fator de potência, rendimento e a taxa de distorção harmônica da corrente na entrada dos retificadores monofásicos Boost e SEPIC. Os retificadores possuem elevado fator de potência, são modulados por largura de pulso e operam no modo de condução descontinuo. São apresentados os resultados obtidos em simulação numérica com objetivo de validar o estudo teórico. Na sequência são mostrados os resultados experimentais atingidos nas topologias dos retificadores. Os retificadores são projetados para tensão eficaz na entrada de 127 V com frequência de 60 Hz, potência processada de 300 W, tensão na saída de 250 V e frequência de comutação de 20 kHz.

Palavras-chave: Boost. SEPIC. Retificador monofásico. Modo de condução descontinuo. Elevado fator de potência.

ABSTRACT

PEREIRA, Vanderson Damião. **Comparative analysis between Boost and SEPIC single phase rectifiers operating in discontinuous conducting mode.** 2016. 109. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2016.

The work presents a comparative analysis among the experimental results, aiming power factor correction, efficiency and total harmonic distortion of the Boost and SEPIC single phase rectifiers. The rectifiers have high power factor, they are modulated by pulse-width and operate in discontinuous conduction mode. The results obtained in numerical simulation are presented in order to validate the theoretical study. In sequence the experimental results obtained in the three studied rectifier topologies are shown. The rectifiers are designed for the RMS input voltage of 127 V with 60 Hz frequency, rated power of 300 W, output voltage of 250 V and commutation frequency with 20 kHz.

Keywords: Boost. SEPIC. Single phase rectifiers. Discontinuous conducting mode. High power factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Retificador Boost.....	19
Figura 2 - Primeira etapa de operação do conversor Boost	20
Figura 3 - Segunda etapa de operação do conversor Boost	20
Figura 4 - Terceira etapa de operação do conversor Boost	21
Figura 5 - Principais formas de onda ideais do conversor Boost.....	21
Figura 6 - Retificador SEPIC	22
Figura 7 - Primeira etapa de operação do conversor SEPIC	23
Figura 8 - Segunda etapa de operação do conversor SEPIC	23
Figura 9 - Terceira etapa de operação do conversor SEPIC.....	24
Figura 10 - Principais formas de onda ideais do conversor SEPIC	24
Figura 11 - Retificador Boost com indicação das grandezas mensuradas	54
Figura 12 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 1.....	55
Figura 13 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 1	55
Figura 14 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1	56
Figura 15 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1.....	56
Figura 16 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	57
Figura 17 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	57
Figura 18 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	58
Figura 19 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	58
Figura 20 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1	59
Figura 21 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1	59
Figura 22 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1	60
Figura 23 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1.....	60
Figura 24 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 1	61
Figura 25 - Retificador SEPIC com indicação das grandezas mensuradas	63
Figura 26 - Corrente e tensão na entrada do retificador SEPIC.....	63
Figura 27 - Ondulação da corrente na entrada do retificador SEPIC	64
Figura 28 - Corrente no indutor L_i do retificador SEPIC	64
Figura 29 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador SEPIC.....	65
Figura 30 - Tensão no interruptor S do retificador SEPIC	65
Figura 31 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador SEPIC	66
Figura 32 - Corrente no interruptor S do retificador SEPIC	66

Figura 33 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador SEPIC.....	67
Figura 34 - Tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC	67
Figura 35 - Ondulação da tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC	68
Figura 36 - Corrente no capacitor C_i do retificador SEPIC	68
Figura 37 - Ondulação da corrente no capacitor C_i do retificador SEPIC.....	69
Figura 38 - Corrente no indutor L_o do retificador SEPIC.....	69
Figura 39 - Ondulação da corrente no indutor L_o do retificador SEPIC	70
Figura 40 - Tensão no diodo D do retificador SEPIC	70
Figura 41 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador SEPIC	71
Figura 42 - Corrente no diodo D do retificador SEPIC	71
Figura 43 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador SEPIC	72
Figura 44 - Corrente e tensão na saída do retificador SEPIC	72
Figura 45 - Esquema elétrico do retificador Boost.....	74
Figura 46 - Esquema elétrico do retificador SEPIC	74
Figura 47 - <i>Layout</i> do retificador Boost	75
Figura 48 - <i>Layout</i> do retificador	75
Figura 49 - Retificador Boost MCD.....	76
Figura 50 - Retificador MCD.....	76
Figura 51 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 1.....	77
Figura 52 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 1	78
Figura 53 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1	78
Figura 54 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1.....	79
Figura 55 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	79
Figura 56 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1.....	80
Figura 57 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	80
Figura 58 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1	81
Figura 59 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1	81
Figura 60 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1	82
Figura 61 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1	82
Figura 62 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1.....	83
Figura 63 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 1	83
Figura 64 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 2.....	85
Figura 65 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 2.....	85
Figura 66 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 2	86

Figura 67 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 2.....	86
Figura 68 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 2.....	87
Figura 69 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 2.....	87
Figura 70 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 2.....	88
Figura 71 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 2	88
Figura 72 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 2	89
Figura 73 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 2	89
Figura 74 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 2	90
Figura 75 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 2.....	90
Figura 76 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 2	91
Figura 77 - Corrente e tensão na entrada do retificador SEPIC	92
Figura 78 - Ondulação da corrente na entrada do retificador SEPIC	93
Figura 79 - Corrente no indutor L_i do retificador SEPIC	94
Figura 80 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador SEPIC.....	94
Figura 81 - Tensão no interruptor S do retificador SEPIC	95
Figura 82 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador SEPIC	95
Figura 83 - Corrente no interruptor S do retificador SEPIC	96
Figura 84 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador SEPIC.....	96
Figura 85 - Tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC	97
Figura 86 - Ondulação da tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC	97
Figura 87 - Corrente no indutor L_o do retificador SEPIC.....	98
Figura 88 - Ondulação da corrente no indutor L_o do retificador SEPIC	98
Figura 89 - Tensão no diodo D do retificador SEPIC	99
Figura 90 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador SEPIC	99
Figura 91 - Corrente no diodo D do retificador SEPIC	100
Figura 92 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador SEPIC	100
Figura 93 - Corrente e tensão na saída do retificador SEPIC	101
Figura 94 - Rendimento dos retificadores	104
Figura 95 - TDH dos retificadores	105
Figura 96 - Fator de potência dos retificadores	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de projeto para o retificador Boost.....	44
Tabela 2 – Valores teóricos das grandezas do retificador Boost.....	47
Tabela 3 - Lista de componentes do retificador Boost	48
Tabela 4 - Especificações de projeto para o retificador SEPIC	49
Tabela 5 - Valores teóricos das grandezas do retificador SEPIC.....	52
Tabela 6 - Lista de componentes do retificador SEPIC.....	53
Tabela 7 - Valores das grandezas obtidos através de simulação numérica do retificador Boost Filtro 1	61
Tabela 8 - Valores das grandezas obtidos por meio de simulação numérica do retificador Boost Filtro 2	62
Tabela 9 - Valores das grandezas adquiridos por simulação numérica do retificador SEPIC	73
Tabela 10 - Valores das grandezas obtidos em laboratório do retificador Boost Filtro 1	84
Tabela 11 - Valores das grandezas adquiridos em laboratório do retificador Boost Filtro 2	92
Tabela 12 - Valores das grandezas obtidos em laboratório do retificador SEPIC ...	101

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
FP	Fator de potência
MCC	Modo de condução contínua
MCD	Modo de condução descontínua
MLP	Modulação por largura de pulso
TDH	Taxa de distorção harmônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA DA PESQUISA	15
1.1.1	Delimitação do Tema.....	16
1.2	PROBLEMA.....	16
1.3	HIPÓTESE / PREMISSA.....	16
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Objetivo Geral.....	16
1.4.2	Objetivos Específicos	17
1.5	JUSTIFICATIVA.....	17
1.6	MÉTODO DA PESQUISA.....	18
2	ANÁLISE TEÓRICA.....	19
2.1	ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR BOOST	19
2.2	ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR SEPIC	22
2.3	EQUAÇÕES DE PROJETO DO RETIFICADOR BOOST	25
2.4	EQUAÇÕES DE PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC	31
2.5	FILTRO DE ENTRADA PARA O RETIFICADOR BOOST.....	36
2.6	EQUAÇÕES DE PROJETO FÍSICO DOS INDUTORES.....	38
3	METODOLOGIA DE PROJETO.....	44
3.1	RETIFICADOR BOOST.....	44
3.2	RETIFICADOR SEPIC.....	48
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	54
4.1	RETIFICADOR BOOST USANDO A PRIMEIRA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA.....	54
4.2	RETIFICADOR BOOST USANDO A SEGUNDA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA.....	62
4.3	RETIFICADOR SEPIC.....	63
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	74
5.1	RETIFICADOR BOOST USANDO A PRIMEIRA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTADA	77
5.2	RETIFICADOR BOOST USANDO A SEGUNDA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA.....	84
5.3	RETIFICADOR SEPIC.....	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

A tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica é incompatível para praticamente todos os equipamentos eletrônicos, porque eles requerem um determinado nível médio de tensão contínua e a concessionária fornece tensão alternada com, por exemplo, 180 V de pico. Para contornar este problema são utilizados retificadores ou conversores CA-CC.

Depois de retificada a tensão alternada da rede elétrica, é necessário manter a tensão contínua com um nível médio específico. Para isto, são utilizados conversores CC-CC. Estes conversores têm a propriedade de manter a tensão de saída invariante mesmo com a variação da tensão de entrada ou da carga. Quando operam com frequência elevada, os conversores possuem peso e volume reduzidos.

A literatura técnica apresenta várias topologias de retificadores monofásicos e trifásicos, que vão dos mais simples retificadores a diodo até os modernos retificadores modulados por largura de pulso (MLP) com elevado fator de potência. Os retificadores MLP possuem várias vantagens quando comparados aos retificadores a diodo, podendo-se destacar: apresentam menor peso e volume devido à operação em alta frequência; controle da tensão na saída; corrente na entrada com reduzido conteúdo harmônico. Desta maneira, contribuem para a qualidade de energia dos sistemas alimentadores (FONT, 2009).

Retificadores do tipo Boost são amplamente estudados na literatura. Estes possibilitam ter uma tensão contínua na saída superior à tensão de pico do sistema alimentador. Tais retificadores possuem entrada com característica de fonte de corrente e saída com característica de fonte de tensão (COSTA, 2014).

Os retificadores do tipo Boost, quando operam no modo de condução contínuo (MCC), minimizam ou eliminam a utilização de filtros de entrada (VIDAL, 2008). Contudo, quando operam no modo de condução descontínuo requerem, obrigatoriamente, o uso de filtros para reduzir o conteúdo harmônico das correntes de entrada (COSTA, 2014).

Retificadores Boost monofásicos e trifásicos são utilizados como estágio de entrada em fontes de alimentação para equipamentos eletrônicos e em outras aplicações, com destaque nos sistemas eletrônicos de processamento da energia de geradores eólicos. As principais vantagens destes retificadores são: baixa distorção harmônica das correntes na entrada, controle da tensão na saída, elevado

rendimento e baixo esforço de filtragem das correntes de entrada (SINGH, 2003; SINGH, 2004; FRIEDLI, 2013; FRIEDLI, 2014; ORTMANN, 2014).

Retificadores SEPIC têm a vantagem de apresentar baixo esforço de filtragem da corrente na entrada, comparado aos retificadores Boost em MCD, menores níveis de tensão na saída, como os retificadores Buck, baixa distorção harmônica da corrente na entrada (ela é senoidal em fase com a tensão na entrada). Como desvantagem, apresentam um indutor e um capacitor adicionais quando comparados com os retificadores Boost e Buck (COSTA, 2014).

Quando operam no modo de condução descontínua (MCD), os retificadores SEPIC têm a propriedade de a corrente na entrada seguir naturalmente a tensão na entrada com baixa distorção harmônica. Assim, o retificador apresenta simplicidade no sistema de controle, uma vez que não existe a necessidade de um sistema de controle de corrente (SIMONETTI, 1997).

Retificadores baseados no conversor CC-CC SEPIC possibilitam, de acordo com a razão cíclica, ter uma tensão contínua na saída menor ou maior que a tensão de pico do sistema alimentador. Estes retificadores possuem entrada com característica de fonte de corrente e saída com característica de fonte de tensão. Quando operam em MCD minimizam ou eliminam a utilização de filtros de entrada. Porém, quando operam em MCC dispensam o uso dos referidos filtros (COSTA, 2014).

Inicialmente, serão apresentados os modos de operação, o equacionamento e os resultados de simulação numérica. Posteriormente, será realizada a implementação dos retificadores, bem como a análise e a conclusão do desempenho das estruturas.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Estudo dos retificadores de potência monofásicos Boost e SEPIC operando no modo de condução descontínuo.

1.1.1 Delimitação do Tema

Avaliação experimental do rendimento, qualidade da corrente na entrada e do fator de potência dos retificadores Boost e SEPIC, ambos operando no modo de condução descontínua.

1.2 PROBLEMA

Qual é o comportamento do rendimento, da corrente na entrada e do fator de potência nos retificadores Boost e SEPIC, quando submetidos às mesmas características de tensão na entrada, tensão na saída, frequência de comutação e potência entregue à carga?

1.3 HIPÓTESE / PREMISA

Com projeto adequado dos retificadores, após avaliação dos resultados experimentais demonstrar qual retificador, Boost ou SEPIC, apresenta maior rendimento e fator de potência, melhor qualidade da corrente na entrada com menor taxa de distorção harmônica para o mesmo volume dos elementos armazenadores de energia, tais como capacitores e indutores.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar o rendimento, o fator de potência e a qualidade da corrente na entrada dos retificadores Boost e SEPIC.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar teoricamente os retificadores;
- Dimensionar os componentes que serão utilizados na implementação dos retificadores;
- Projetar os retificadores;
- Realizar simulação numérica dos retificadores;
- Avaliar os resultados das simulações numéricas;
- Construir protótipo dos retificadores;
- Analisar os resultados experimentais;
- Comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos via simulação numérica.

1.5 JUSTIFICATIVA

Inicialmente, foi dada pouca importância aos retificadores operando no modo de condução descontínua, pois devido à limitação tecnológica eles não conseguiam obter alto rendimento. Atualmente, devido à tecnologia mais desenvolvida dos semicondutores, grupos de pesquisa tem se dedicado ao estudo destes retificadores que passaram a ter níveis de rendimento mais próximos dos que operam no modo de condução contínua. No modo de operação descontínua, os retificadores possuem a característica de a corrente na entrada seguir naturalmente a tensão na entrada com baixa distorção harmônica, não necessitando realizar um sistema para o controle da corrente na entrada, tornando o projeto de controle mais simples, diminuindo o custo destes retificadores e tornando-os mais competitivos.

Apesar da grande relevância do tema proposto, não se encontra referência específica relacionada a esta proposta, por isto, torna-se interessante a obtenção e comparação de resultados experimentais dos retificadores Boost e SEPIC operando no modo de condução descontínua.

1.6 MÉTODO DA PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa serão utilizadas informações provenientes de materiais já publicados sobre o assunto, como livros, teses, dissertações, artigos de periódicos e também informações apresentadas em congressos de eletrônica de potência. Após reunir todo suporte técnico e científico necessário para construção do projeto, com posse dos dados coletados nas medições executadas em laboratório será possível realizar a análise dos resultados experimentais e confrontá-los com os que foram obtidos teoricamente.

A pesquisa a ser realizada nesse projeto é de natureza aplicada, e quanto aos seus objetivos, é exploratória, pois busca expor as qualidades dos retificadores Boost e SEPIC operando no modo de condução descontínuo. Quanto à metodologia, o trabalho faz opção pelo método indutivo. E esta opção se justifica porque o método indutivo parte de um caso particular para a generalização, ou seja, quando outros conversores operam no modo de condução descontínua também possuem algumas características semelhantes aos conversores explorados neste trabalho.

2 ANÁLISE TEÓRICA

Em todas as considerações feitas na análise teórica, os retificadores monofásicos são considerados ideais, operando no modo de condução descontínuo em regime permanente.

2.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR BOOST

A topologia do retificador que será analisado é exposta na Figura 1, mas para simplificar a análise será considerado o conversor Boost em sua configuração CC-CC, para efeito de descrição das etapas de funcionamento. No modo de condução descontínuo o retificador Boost possui três etapas de operação, que serão apresentadas na sequência.

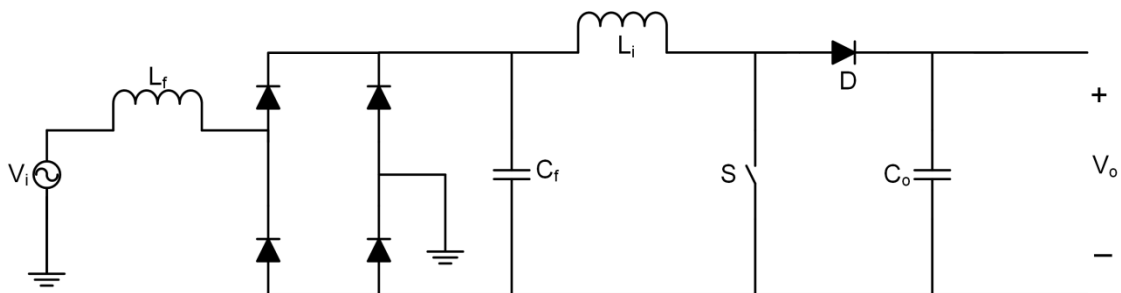


Figura 1 - Retificador Boost
Fonte: Autoria própria

A primeira etapa correspondente à magnetização do indutor L_i e inicia-se no instante t_0 e termina em t_1 . Em t_0 o interruptor S é fechado e a tensão nele é zero. O indutor L_i começa armazenar energia recebida da fonte V_i , portanto a corrente neste indutor cresce linearmente até atingir seu valor de pico em t_1 , quando o interruptor S é aberto. O diodo D está bloqueado com uma tensão reversa igual a da carga. A carga é alimentada pelo capacitor C_o . O circuito do conversor equivalente à primeira etapa é apresentado na Figura 2.

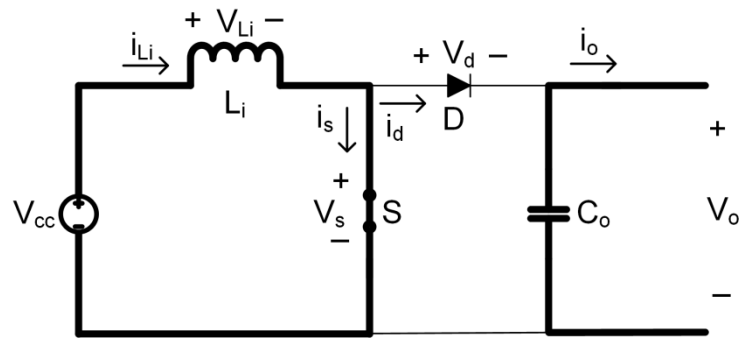


Figura 2 - Primeira etapa de operação do conversor Boost
Fonte: Autoria própria

A segunda etapa correspondente a desmagnetização do indutor L_i , se inicia no instante t_1 e termina em t_2 . No instante t_1 o interruptor S é aberto e recebe uma tensão de igual valor à tensão na saída. O indutor L_i começa ser desmagnetizado, a corrente neste indutor decresce linearmente até t_2 quando seu valor é igual a zero. O diodo D está conduzindo, a carga e o capacitor C_o são alimentados pela fonte V_i e pelo indutor L_i . O circuito do conversor equivalente à segunda etapa é apresentado na Figura 3.

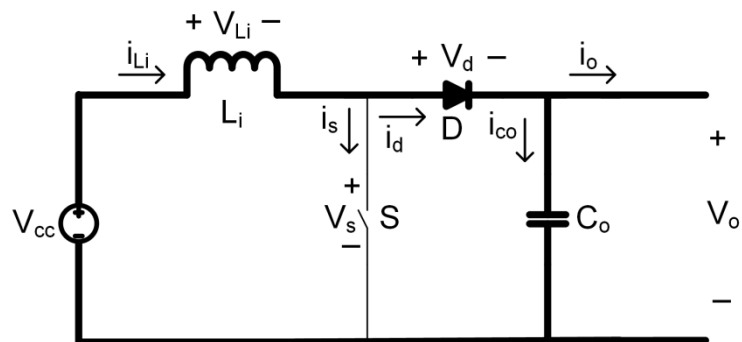


Figura 3 - Segunda etapa de operação do conversor Boost
Fonte: Autoria própria

A terceira etapa que corresponde a etapa de descontinuidade do conversor tem início no instante t_2 e término em T , onde T é o período de comutação. Durante esta etapa, o interruptor S continua aberto, mas agora recebe uma tensão com a mesma intensidade da tensão de alimentação do circuito. O indutor L_i está totalmente desmagnetizado, pois toda sua energia foi transferida à carga. A fonte não fornece energia e a corrente neste indutor é nula. O diodo D encontra-se

bloqueado. A carga é alimentada pelo capacitor C_o . A Figura 4 mostra o circuito do conversor equivalente à terceira etapa de operação.

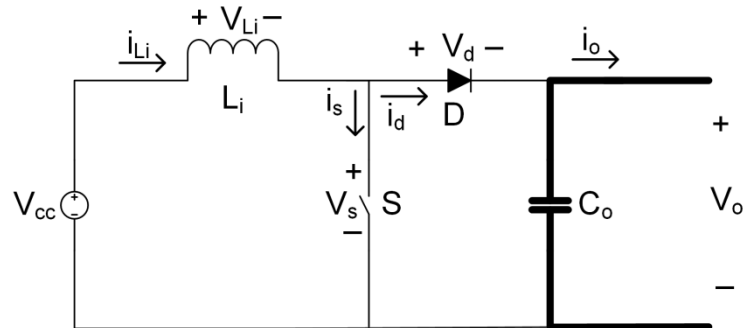


Figura 4 - Terceira etapa de operação do conversor Boost
Fonte: Autoria própria

Depois de encerrada a terceira etapa de operação do conversor, o interruptor S é fechado retornando a primeira etapa e iniciando um novo ciclo de operação. As principais formas de onda ideais de tensão e corrente correspondente às etapas de operação do conversor são apresentadas na Figura 5.

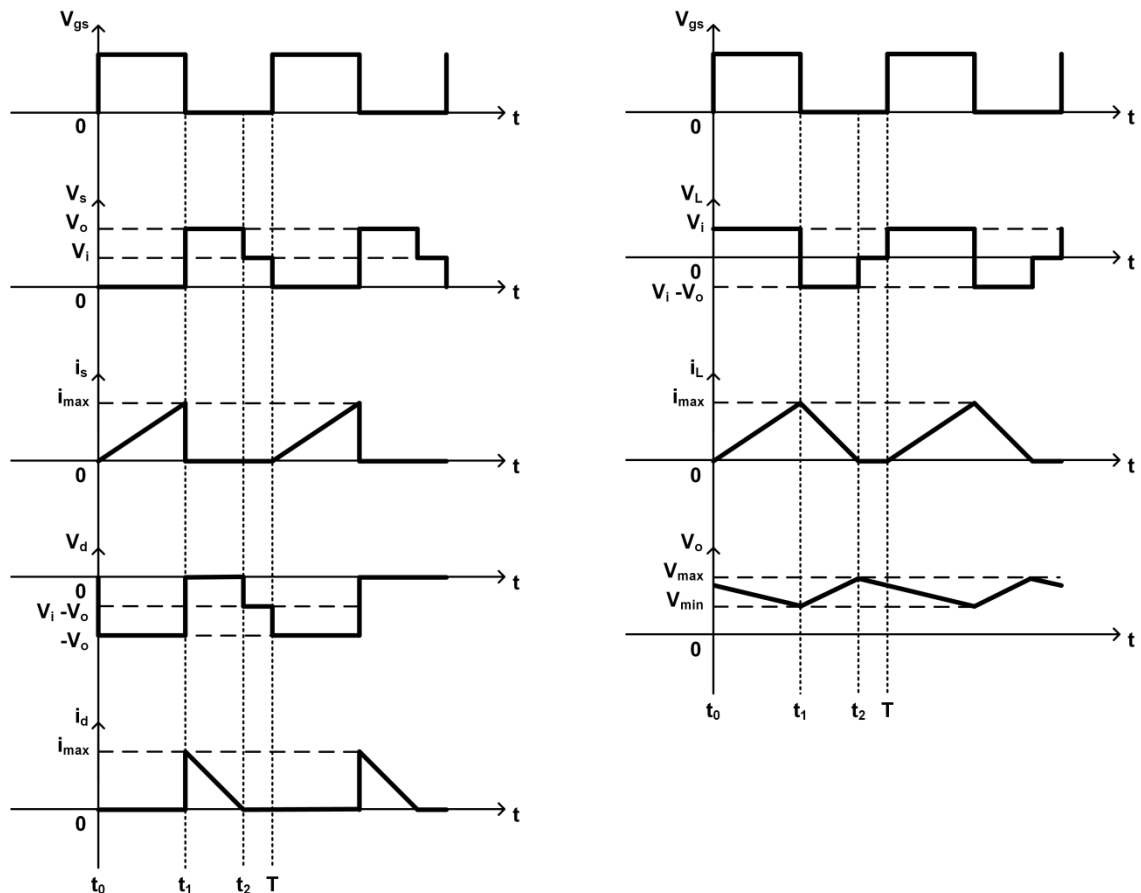


Figura 5 - Principais formas de onda ideais do conversor Boost
Fonte: Autoria própria

2.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR SEPIC

A topologia do retificador que será analisado é exposta na Figura 6, mas para simplificar a análise será considerado o conversor SEPIC em sua configuração CC-CC, para efeito de descrição das etapas de funcionamento. Em regime permanente os valores médios das tensões nos indutores são nulos. Assim, os valores da tensão do capacitor na entrada e do capacitor na saída são iguais, aos valores de tensão da fonte de alimentação e de tensão na carga respectivamente (desprezando-se as ondulações de alta frequência). No modo de condução descontínuo, o retificador SEPIC possui três etapas de operação, que serão apresentadas na sequência.

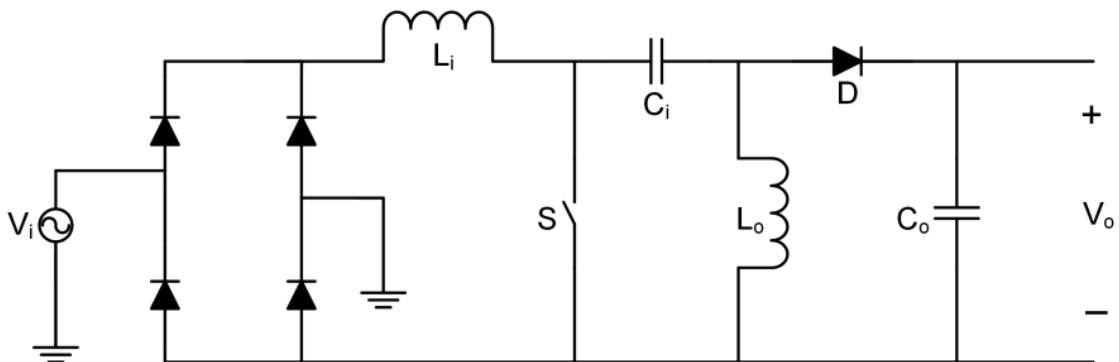


Figura 6 - Retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A primeira etapa correspondente a magnetização dos indutores L_i e L_o e inicia-se no instante t_0 e termina em t_1 . Em t_0 o interruptor S é fechado e a tensão nele é zero. Os dois indutores começam armazenar energia recebida da fonte V_i e do capacitor C_i , portanto, a corrente nos indutores cresce linearmente até atingir seu valor de pico em t_1 , quando o interruptor S é aberto. O diodo D está bloqueado e reversamente polarizado com uma tensão igual a da carga. A carga é alimentada pelo capacitor C_o . O circuito do conversor equivalente à primeira etapa é apresentado na Figura 7.

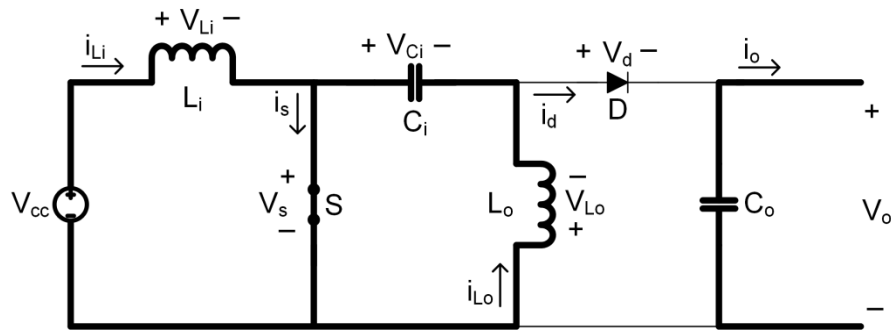


Figura 7 - Primeira etapa de operação do conversor SEPIC
Fonte: Autoria própria

A segunda etapa correspondente a desmagnetização dos indutores L_i e L_o , ela tem início no instante t_1 e termina em t_2 . No instante t_1 o interruptor S é aberto e recebe uma tensão que é igual ao valor da soma da tensão na saída com a tensão na entrada. Inicia-se o processo de desmagnetização dos indutores L_i e L_o , a corrente nestes indutores decresce linearmente até t_2 . O diodo D entra em condução, a carga e o capacitor C_o são alimentados pela fonte V_i e pelos indutores L_i e L_o . O circuito do conversor equivalente à segunda etapa é apresentado na Figura 8.

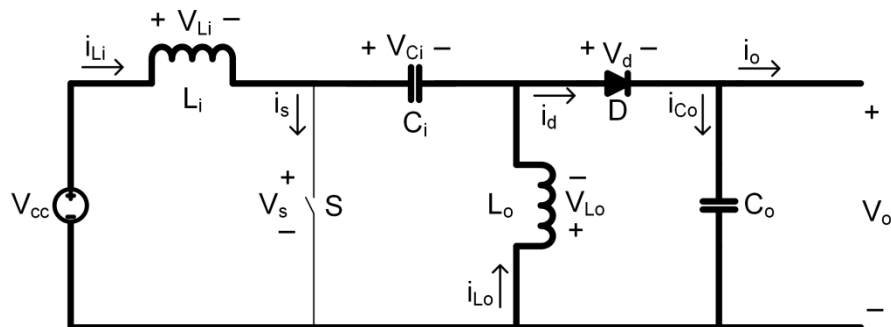


Figura 8 - Segunda etapa de operação do conversor SEPIC
Fonte: Autoria própria

A terceira etapa corresponde à etapa de descontinuidade do conversor com início no instante t_2 e término em T , onde T é o período de comutação. Durante esta etapa o interruptor S continua aberto, mas agora recebe uma tensão com a mesma intensidade da tensão de alimentação do circuito. A corrente i_{L_i} é constante e igual a corrente i_{L_o} , cujo valor em módulo é o mesmo da corrente da fonte, mas com sinal contrário. O diodo D encontra-se bloqueado e a carga é alimentada pelo capacitor

C_o . A Figura 9 mostra o circuito do conversor equivalente à terceira etapa de operação.

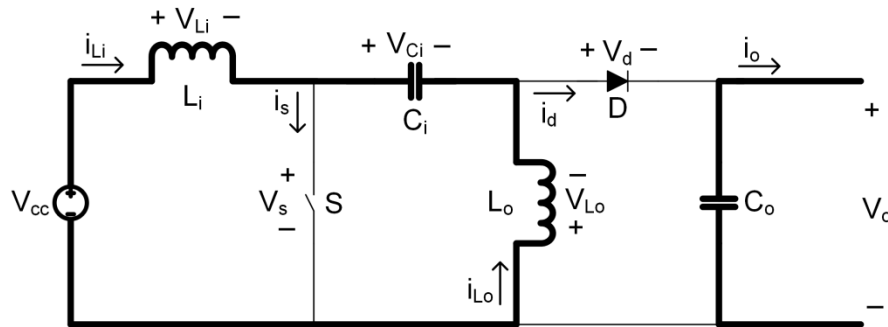


Figura 9 - Terceira etapa de operação do conversor SEPIC
Fonte: Autoria própria

Depois de encerrada a terceira etapa de operação do conversor, o interruptor S é fechado retornando a primeira etapa e iniciando um novo ciclo de operação. As principais formas de onda ideais de tensão e corrente correspondente às etapas de operação do conversor são apresentadas na Figura 10.

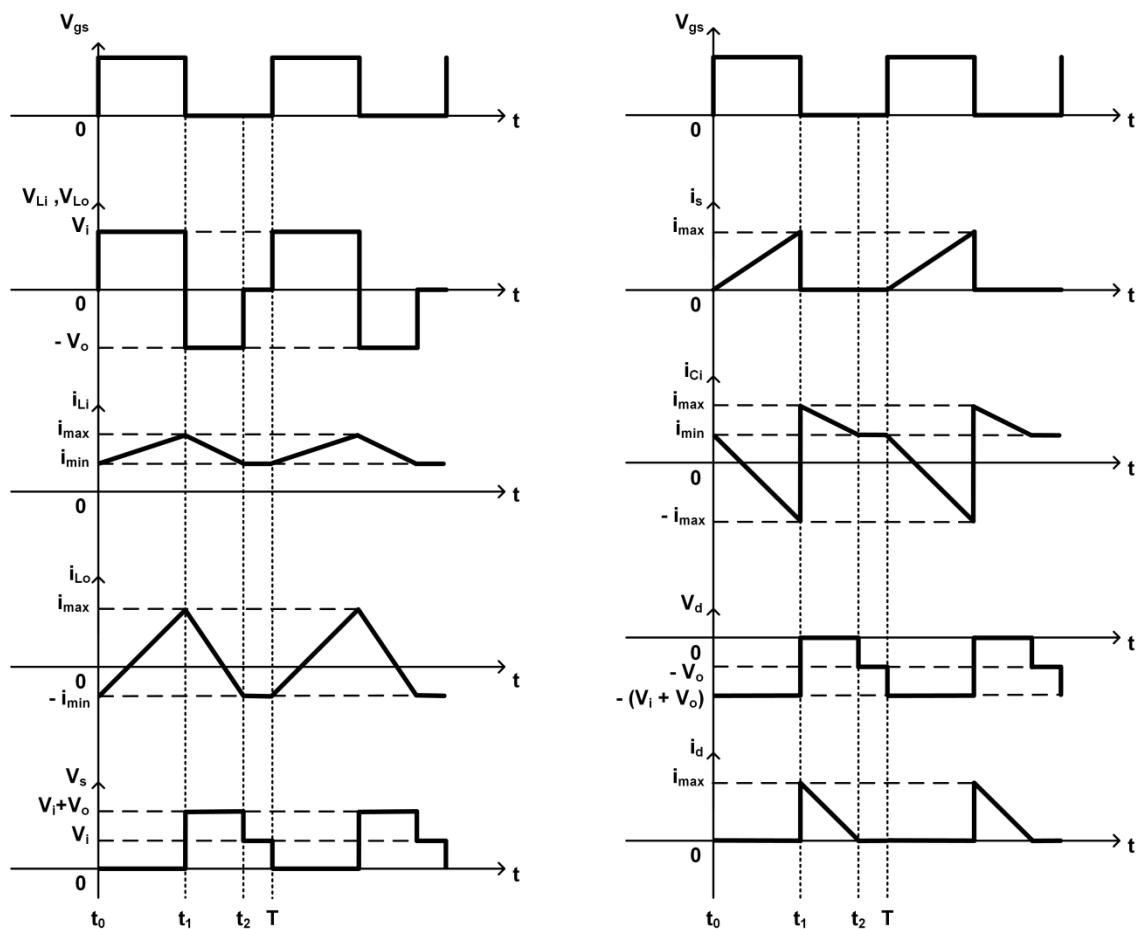


Figura 10 - Principais formas de onda ideais do conversor SEPIC
Fonte: Autoria própria

2.3 EQUAÇÕES DE PROJETO DO RETIFICADOR BOOST

Conhecendo-se as etapas de operação e as formas de onda é possível obter as equações do retificador, que podem ser utilizadas no dimensionamento dos componentes. Na comparação dos valores teóricos, com os da simulação numérica e os obtidos em laboratório.

A razão cíclica (D) definida na Equação 1 é a razão entre o tempo de condução do transistor e o período de comutação.

$$D = \frac{t_1}{T} \quad (1)$$

Onde:

t_1 : tempo de condução do transistor S;

T: período de comutação.

Para garantir a condução descontínua é preciso conhecer a máxima razão cíclica que pode ser empregada, ela é representada pela Equação 2.

$$D \leq (1 - \alpha) \quad (2)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_o}$$

Sendo:

V_o : tensão na saída;

V_p : valor de pico da tensão de alimentação.

O valor de pico da tensão de alimentação é obtido por meio da Equação 3.

$$V_p = V_{ief} \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

Onde:

V_{ief} : valor eficaz da tensão de alimentação.

Considerando a tensão de alimentação senoidal, tem-se a Equação 4.

$$V_i(t) = V_p \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

Onde:

V_i : tensão na entrada

O ganho estático apresentado na Equação 5 é definido como a relação entre a tensão na saída e a tensão na entrada do retificador.

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i \cdot D^2}{2 \cdot f_s \cdot L_i \cdot I_o} \quad (5)$$

Onde:

f_s : frequência de comutação;

L_i : valor da indutância do indutor L_i ;

I_o : valor médio de corrente na saída.

A corrente de pico no indutor L_i (I_{Lip}) é determinada pela Equação 6:

$$I_{Lip} = \frac{V_p \cdot t_1}{L_i} = \frac{(V_o - V_p) \cdot (t_2 - t_1)}{L_i} \quad (6)$$

Onde:

t_2 : intervalo quando a corrente no indutor L_i se anula.

Com a Equação 6 é possível observar que a corrente na entrada do indutor L_i será a mesma tanto no intervalo de condução do interruptor S como no intervalo de condução do diodo D. Reorganizando os elementos da Equação 6 obtém-se a Equação 7.

$$V_p \cdot t_1 = (V_o - V_p) \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

O valor da indutância na entrada que garante a condução descontínua pode ser determinado através da Equação 8.

$$L_i = \frac{V_p^2}{2\pi \cdot f_s \cdot P_{omax}} \cdot \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} \cdot y(\alpha) \quad (8)$$

Onde:

P_{omax} : potência máxima na saída.

Sendo:

$$y(\alpha) = \frac{2}{\alpha \cdot \sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right) - 2 - \frac{\pi}{\alpha}$$

A Equação 9 define a corrente média durante o intervalo no tempo de crescimento da corrente na entrada (I_{imed1}), sendo que a Equação 10 representa a corrente média no tempo de decrescimento da corrente na entrada (I_{imed2}). A Equação 11 define a corrente média na entrada para um período de chaveamento (I_{imed}), representada pela soma das duas parcelas descritas anteriormente.

$$I_{imed1} = \frac{I_{Lip} \cdot t_1}{2 \cdot T} \quad (9)$$

$$I_{imed2} = \frac{I_{Lip} \cdot (t_2 - t_1)}{2 \cdot T} \quad (10)$$

$$I_{imed} = \frac{I_{Lip} \cdot t_2}{2 \cdot T} \quad (11)$$

A Equação 12 define o valor da corrente média no indutor L_i durante um semiciclo da fonte de alimentação (I_{LMED}).

$$I_{LMED} = \frac{D^2 \cdot V_o}{2\pi \cdot L_i \cdot f_s} \cdot \left(-\pi + \frac{2}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right) \right) \quad (12)$$

A Equação 13 define a corrente eficaz na entrada durante um semiciclo da fonte de alimentação (I_{IEF}), que é igual à corrente eficaz no indutor L_i .

$$I_{IEF} = \sqrt{I_{SEF}^2 + I_{DEF}^2} \quad (13)$$

A Equação 14 representa a potência na entrada (P_i).

$$P_i = \frac{V_p \cdot D^2 \cdot V_o}{2\pi \cdot f_s \cdot L_i} \cdot \gamma(\alpha) \quad (14)$$

O fator de potência (FP) não é unitário porque a corrente na entrada não é idealmente senoidal. Isto ocorre devido à distorção introduzida pelo tempo de desmagnetização do indutor L_i . Esta distorção é função da relação entre tensão de pico na entrada e tensão na saída. O fator de potência pode ser obtido através da Equação 15.

$$FP = \frac{\sqrt{2} \cdot \gamma(\alpha)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot z(\alpha)}} \quad (15)$$

Sendo:

$$z(\alpha) = \frac{2}{(1-\alpha^2)} + \frac{\pi}{\alpha} + \frac{2 \cdot \alpha^2 - 1}{\alpha \cdot (1-\alpha^2)} \cdot \frac{2}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right)$$

Com a Equação 16 pode-se obter a taxa de distorção harmônica (TDH), que é a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas da corrente e sua fundamental. Além de quantizar a injeção de harmônicas na rede de alimentação, a TDH influencia na qualidade do fator de potência.

$$TDH = \sqrt{\frac{\cos^2(\emptyset)}{FP^2} - 1} \quad (16)$$

Considerando $\cos(\emptyset) = 1$, tem-se a Equação 17.

$$TDH = \sqrt{\frac{1}{FP^2} - 1} \quad (17)$$

A corrente eficaz no indutor L_i (I_{Lief}) é igual a corrente eficaz na fonte de alimentação, sendo determinada pela Equação 18.

$$I_{Lief} = I_{IEF} = \sqrt{I_{SEF}^2 + I_{DEF}^2} \quad (18)$$

Onde:

I_{SEF} : corrente eficaz no interruptor S para um período da rede de alimentação;

I_{DEF} : corrente eficaz no diodo D para um período da rede de alimentação.

A relação entre a corrente média no indutor L_i e a corrente média na saída é representada pela Equação 19.

$$\frac{I_{LMED}}{I_o} = 1 + \frac{2}{y(\alpha)} \quad (19)$$

A corrente média no interruptor S para um período de chaveamento (I_{Smed}) é definida pela Equação 20.

$$I_{Smed} = \frac{V_p \cdot D^2}{2 \cdot f_s \cdot L_i} \quad (20)$$

Por meio da Equação 21 é possível determinar a corrente média no interruptor S para um período da fonte de alimentação (I_{SMED}).

$$I_{SMED} = \frac{V_p \cdot D^2}{\pi \cdot f_s \cdot L_i} \quad (21)$$

Com a Equação 22 obtém-se a corrente eficaz no interruptor S para um período de chaveamento (I_{Sef}).

$$I_{Sef} = \frac{V_p \cdot \sqrt{D^3}}{\sqrt{3} \cdot f_s \cdot L_i} \quad (22)$$

Através da Equação 23 determina-se a corrente eficaz no interruptor S para um período da fonte de alimentação.

$$I_{SEF} = \frac{V_p \cdot \sqrt{D^3}}{\sqrt{6} \cdot f_s \cdot L_i} \quad (23)$$

A corrente de pico no interruptor S pode ser determinada utilizando a Equação 6. Considerando o capacitor um circuito totalmente aberto para valores médios de corrente, a corrente média no diodo D é igual à corrente média na carga (I_o). A Equação 24 define a corrente eficaz no diodo D para um período de chaveamento (I_{Def}).

$$I_{Def} = \frac{V_p}{f_s \cdot L_i} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot D^3}{3 \cdot (1-\alpha)}} \quad (24)$$

A Equação 25 define a corrente eficaz no diodo D para um período da fonte de alimentação (I_{DEF}).

$$I_{DEF} = \frac{V_p}{L_i \cdot f_s} \cdot \sqrt{\frac{D^3}{3\pi} \cdot \left(\frac{y(\alpha)}{\alpha} - \frac{\pi}{2} \right)} \quad (25)$$

O capacitor na saída (C_o) pode ser determinado por meio da Equação 26.

$$C_o = \frac{V_o \cdot D \cdot \alpha^2}{8\pi \cdot L_i \cdot f_s \cdot f \cdot \Delta V_o} \quad (26)$$

Onde:

f: frequência na fonte de alimentação;

ΔV_o : ondulação de tensão na carga.

A corrente média na saída para um período de chaveamento (I_{omed}) pode ser obtida pela Equação 27.

$$I_{omed} = \frac{V_p \cdot D^2 \cdot \alpha \cdot \sin^2(\omega t)}{2 \cdot f_s \cdot L_i \cdot (1 - \alpha \cdot \sin(\omega t))} \quad (27)$$

A corrente média na saída para um período da fonte de alimentação (I_o) é obtida com a Equação 28.

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{V_p \cdot D^2 \cdot y(\alpha)}{2\pi \cdot f_s \cdot L_i} \quad (28)$$

A Equação 29 define a máxima corrente na saída (I_{omax}), que ocorre quando a razão cíclica for máxima.

$$I_{omax} = \frac{V_p \cdot (1-\alpha)^2 \cdot y(\alpha)}{2\pi \cdot f_s \cdot L_i} \quad (29)$$

A potência máxima na saída é obtida por meio da Equação 30.

$$P_{omax} = V_o \cdot I_{omax} \quad (30)$$

2.4 EQUAÇÕES DE PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC

Conhecendo-se as etapas de operação e as formas de onda é possível obter as equações do retificador, que podem ser utilizadas no dimensionamento dos componentes, na comparação dos valores teóricos com os da simulação numérica e as obtidas em laboratório.

A Equação 31 representa o intervalo de tempo que corresponde à primeira etapa de funcionamento do conversor (Δt_1).

$$\Delta t_1 = D \cdot T \quad (31)$$

Através da Equação 32 obtém-se o intervalo de tempo que corresponde à segunda etapa de funcionamento do conversor (Δt_2).

$$\Delta t_2 = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{V_o} \quad (32)$$

Por meio da Equação 33 é definido o intervalo de tempo que corresponde à terceira etapa de funcionamento do conversor (Δt_3).

$$\Delta t_3 = \frac{(V_o \cdot (1-D) - V_i \cdot D) \cdot T}{V_o} \quad (33)$$

A razão cíclica pode ser definida através da Equação 1. A Equação 34 determina a máxima razão cíclica que garante o modo de condução descontínuo para determinada condição de carga.

$$D \leq 1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{L_i \cdot L_o \cdot f_s}{R_o \cdot (L_i + L_o)}} \quad (34)$$

Onde:

L_o : valor da indutância no indutor L_o ;

R_o : valor da resistência na saída do conversor.

O ganho estático apresentado na Equação 35 é definido pela relação entre a tensão na saída e a tensão de pico na entrada do retificador.

$$\frac{V_o}{V_p} = D \cdot \sqrt{\frac{R_o \cdot (L_i + L_o)}{4 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s}} \quad (35)$$

Ao final de Δt_1 as correntes nos indutores L_i e L_o atingem seus valores máximos, são representados respectivamente na Equação 36 e na Equação 37.

$$I_{L_i max} = \frac{D \cdot V_p \cdot [D \cdot (V_o \cdot L_i - V_p \cdot L_o) + 2 \cdot V_o \cdot L_o]}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (36)$$

$$I_{L_o max} = \frac{D \cdot V_p \cdot [2 \cdot V_o \cdot L_i - D \cdot (V_o \cdot L_i - V_p \cdot L_o)]}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (37)$$

Onde:

$I_{L_i max}$: máxima corrente no indutor L_i ;

$I_{L_o max}$: máxima corrente no indutor L_o .

Ao final de Δt_2 as correntes nos indutores atingem seus valores mínimos. Devido ao fato destas correntes possuírem o mesmo valor, porém com sentidos

opostos tem-se um valor nulo de corrente. Estes valores mínimos de corrente podem ser verificados por meio da Equação 38 e Equação 39.

$$I_{L_{imin}} = \frac{D^2 \cdot V_p (V_o \cdot L_i - V_i \cdot L_o)}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (38)$$

$$I_{L_{omin}} = -I_{L_{imin}} \quad (39)$$

Onde:

$I_{L_{imin}}$: mínima corrente no indutor L_i ;

$I_{L_{omin}}$: mínima corrente no indutor L_o .

A ondulação de corrente nos indutores é a diferença algébrica entre a corrente máxima e a corrente mínima, seus valores podem ser determinados através da Equação 40 e da Equação 41.

$$\Delta I_{L_i} = \frac{V_p \cdot D}{L_i \cdot f_s} \quad (40)$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_p \cdot D}{L_o \cdot f_s} \quad (41)$$

Onde:

ΔI_{L_i} : ondulação de corrente em L_i ;

ΔI_{L_o} : ondulação de corrente em L_o ;

A corrente média nos indutores é definida pela Equação 42 e Equação 43.

$$I_{L_{imed}} = \frac{D^2 \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{\pi \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (42)$$

$$I_{L_{omed}} = \frac{D^2 \cdot V_p^2 \cdot (L_i + L_o)}{4 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (43)$$

Onde:

I_{Limed} : valor médio de corrente em L_i ;

I_{Lomed} : valor médio de corrente em L_o .

O valor eficaz de corrente nos indutores é representado pela Equação 44 e pela Equação 45.

$$I_{Lief} = \frac{\sqrt{6}}{24} \cdot \sqrt{\frac{D^3 \cdot V_p^2 \cdot [12 \cdot V_o^2 \cdot L_i \cdot D \cdot (L_i + 2 \cdot L_o) + L_o^2 \cdot (16 \cdot V_o^2 - 9 \cdot V_p^2 \cdot D^2)]}{V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2}} \quad (44)$$

$$I_{L_oef} = \frac{1}{24} \sqrt{\frac{2 \cdot D^3 \cdot V_p^2}{V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2 \cdot \pi} \cdot \left(\begin{aligned} &128 V_p V_o L_i^2 - 192 V_p V_o L_i^2 D + 54 V_p^2 L_i L_i D \pi \\ &+ 48 V_o^2 L_i^2 \pi - 36 V_o^2 L_i^2 D \pi - 27 V_p^2 L_o^2 D \pi \end{aligned} \right)} \quad (45)$$

Onde:

I_{Lief} : valor eficaz de corrente em L_i ;

I_{L_oef} : valor eficaz de corrente em L_o .

O valor de indutância nos indutores L_i e L_o são definidos respectivamente pela Equação 46 e pela Equação 47.

$$L_i = \frac{V_p \cdot D}{\Delta I_{L_i} \cdot f_s} \quad (46)$$

$$L_o = \frac{L_i \cdot R_o \cdot V_p^2 \cdot D^2}{4 \cdot L_i \cdot V_o^2 \cdot f_s - R_o \cdot V_p^2 \cdot D^2} \quad (47)$$

O valor máximo de corrente no interruptor S (I_{Smax}) é determinado pela Equação 48.

$$I_{Smax} = \frac{D \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (48)$$

O valor médio de corrente no interruptor S é definido através da Equação 49.

$$I_{SMED} = \frac{D^2 \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{\pi \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (49)$$

O valor eficaz de corrente no interruptor S é obtido por meio da Equação 50.

$$I_{SEF} = \frac{D \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{L_i \cdot L_o \cdot f_s} \cdot \sqrt{\frac{D}{6}} \quad (50)$$

Com a escolha adequada do capacitor de acoplamento (C_i), tem-se uma baixa ondulação de tensão na frequência de chaveamento. O valor de C_i tem grande influencia sobre a corrente na entrada, ele deve ser pequeno o suficiente para acompanhar a variação da tensão na entrada. As ressonâncias entre C_i , L_i e L_o devem ocorrer numa frequência muito maior que a fonte de alimentação para evitar oscilações na corrente da fonte, porém, devem ser muito menor que a frequência de chaveamento, para que ocorra o bom funcionamento do conversor com correção do fator de potência. A partir da Equação 51 é definido o valor da capacitância de C_i .

$$C_i = \frac{D^2 \cdot V_p \cdot [D \cdot (V_p \cdot L_o - V_o \cdot L_i) + 2 \cdot V_o \cdot L_i]^2}{4 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o \cdot \Delta V_{C_i} \cdot f_s^2} \quad (51)$$

Onde:

ΔV_{C_i} : ondulação de tensão em C_i .

A Equação 52 apresenta o valor da capacitância do capacitor na saída (C_o), que deve ser grande o bastante para armazenar energia necessária à carga para manter a saída constante, sendo que a energia proveniente da fonte de alimentação varia ciclicamente.

$$C_o = \frac{P_o}{2\pi \cdot f \cdot \Delta V_{C_o} \cdot V_o} \quad (52)$$

Onde:

P_o : potência na saída;

ΔV_{C_o} : variação da tensão no capacitor C_o .

O valor médio da corrente no diodo D (I_{DMED}) é igual ao valor médio da corrente no indutor L_o , definido pela Equação 43. A Equação 53 determina o valor eficaz de corrente no diodo D.

$$I_{DEF} = \frac{2 \cdot D \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{3 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot V_p}{\pi \cdot V_o}} \quad (53)$$

O valor máximo de corrente no diodo D (I_{DMAX}) é obtido com a Equação 54.

$$I_{DMAX} = \frac{D \cdot V_p \cdot (L_i + L_o)}{L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (54)$$

Considerando o capacitor um circuito totalmente aberto para valores médios de corrente, tem-se o valor médio de corrente na saída do retificador igual ao valor médio de corrente no diodo D, que por sua vez é equivalente ao valor médio de corrente no indutor L_o , conforme a Equação 43. Também se pode determinar o valor médio de corrente na saída do conversor por meio da Equação 55.

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (55)$$

A Equação 56 determina o valor mínimo de resistência na saída que garante o retificador operar no modo de condução descontínuo.

$$R_o \geq \frac{2 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s}{(1-D)^2 \cdot (L_i + L_o)} \quad (56)$$

2.5 FITRO DE ENTRADA PARA O RETIFICADOR BOOST

Para o retificador Boost é necessário projetar um filtro para redução do conteúdo harmônico inserido pela alta frequência de comutação da corrente na entrada, tornando a forma de onda desta corrente mais próxima de uma senoide ideal.

Foi utilizado um filtro LC do tipo passa-baixa para que o retificador opere sem introduzir harmônicas de ordem elevada na rede elétrica de alimentação. Foi determinada a disposição dos elementos do filtro para garantir que não haja defasagem entre a corrente e tensão na entrada, além de oferecer proteção à ponte retificadora. Assim, conectou-se o capacitor de filtro no lado CC, após a ponte retificadora.

Os elementos do filtro serão projetados utilizando duas metodologias distintas de cálculo, podendo ser denominadas retificador Boost Filtro 1 e retificador Boost Filtro 2. Assim, pode-se avaliar qual opção é mais atrativa comparando a qualidade da corrente na entrada e rendimento com o volume dos componentes do filtro.

Para evitar oscilações em alta frequência e deslocamento de fase em baixa frequência o coeficiente de amortecimento (ζ) deve estar entre 0,7 e 1. Para uma atenuação significativa dos harmônicos, a frequência de corte, ou frequência de ressonância, deve estar entre uma década e um quarto da frequência de comutação. O filtro LC deve ser projetado de tal maneira que a Equação 57 seja satisfeita.

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_f \cdot L_f}} \quad (57)$$

Onde:

ω_c : frequência de corte;

C_f : valor do capacitor do filtro;

L_f : valor do indutor do filtro.

Para projetar o filtro é necessário conhecer a potência drenada da fonte de alimentação. Por tratar-se de um retificador com correção do fator de potência, seu comportamento pode ser representado por uma resistência, cujo valor pode ser determinado pela Equação 58.

$$R_{eq} = \frac{V_p^2}{2 \cdot P_i} \quad (58)$$

Onde:

R_{eq} : valor da resistência equivalente vista pelo filtro.

Com a Equação 59 é obtido o valor de indutância e através da Equação 60 é obtido o valor de capacitância, utilizando a primeira metodologia de cálculo do filtro.

$$L_{f1} = \frac{R_{eq}}{2 \cdot \pi \cdot f_c} \quad (59)$$

$$C_{f1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R_{eq}} \quad (60)$$

Onde:

L_{f1} : valor do indutor do filtro usando a primeira metodologia de cálculo;

f_c : frequência de corte do filtro;

C_{f1} : valor do capacitor do filtro usando a primeira metodologia de cálculo.

O valor de capacitância é definido pela Equação 61 e por meio da Equação 62 é determinado o valor de indutância do filtro, usando a segunda metodologia de cálculo.

$$C_{f2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \zeta \cdot f_c \cdot R_{eq}} \quad (61)$$

$$L_{f2} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_c)^2 \cdot C_{f2}} \quad (62)$$

Onde:

C_{f2} : valor do capacitor do filtro usando a segunda metodologia de cálculo;

L_{f2} : valor do indutor do filtro usando a segunda metodologia de cálculo.

2.6 EQUAÇÕES DE PROJETO FÍSICO DOS INDUTORES

Quando se utiliza o núcleo do tipo E, o primeiro passo é determinar o tamanho deste núcleo através da Equação 63. Com o resultado desta equação é escolhido nos catálogos de fabricantes o tamanho do núcleo adequado para a confecção do indutor. Caso não seja encontrado nos catálogos o valor exato que foi

obtido na Equação 63, deve-se selecionar o núcleo com valor maior e mais próximo do calculado.

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{Lmax} \cdot I_{Lef}}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot K_w} \quad (63)$$

Onde:

A_e : área da perna central do núcleo;

A_w : área da janela do núcleo;

L : valor de indutância;

I_{Lef} : valor de corrente eficaz no indutor;

B_{max} : densidade magnética máxima;

J_{max} : densidade de corrente máxima no enrolamento;

K_w : fator de utilização do enrolamento no núcleo.

Posteriormente pode-se determinar o número de espiras necessário para obter a indutância desejada através da Equação 64, é utilizada a indução magnética máxima permitida para evitar a saturação do núcleo.

$$N_e = \frac{L \cdot I_{Lmax}}{B_{max} \cdot A_e} \quad (64)$$

Onde:

N_e : número de espiras;

I_{Lmax} : máxima corrente no indutor.

É inserido um entreferro para que o indutor opere com valores maiores de corrente no enrolamento não saturando o núcleo. O entreferro aumenta a relutância total do circuito diminuindo o fluxo magnético através do material, garantindo que a indução magnética máxima não exceda seu valor limite. O entreferro torna o indutor praticamente insensível às variações da permeabilidade no núcleo, que é um parâmetro extremamente dependente da temperatura e do ponto de operação. O entreferro é calculado por meio da Equação 65.

$$l_e = \frac{N_e^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{L} \quad (65)$$

Onde:

l_e : comprimento do entreferro;

μ_o : permeabilidade do ar.

Na utilização de condutores em alta frequência deve-se considerar o efeito pelicular (efeito skin), pois, à medida que a frequência aumenta a corrente no interior de um condutor tende a se distribuir pela periferia, portanto, existe maior densidade de corrente nas bordas e menor na região central. O efeito pelicular limita o diâmetro do cobre do condutor a ser utilizado no enrolamento do indutor. A Equação 66 determina o diâmetro máximo do cobre deste condutor.

$$d_{max} = \frac{15}{\sqrt{f_s}} \quad (66)$$

Onde:

d_{max} : diâmetro máximo do cobre do condutor.

Através da Equação 67 é encontrada a área da secção transversal do cobre necessária para suportar a corrente eficaz, com a densidade de corrente admitida no condutor.

$$S_{fio} = \frac{I_{Lef}}{J_{max}} \quad (67)$$

Onde:

S_{fio} : área da secção transversal do cobre, calculado.

Caso a área da secção transversal de cobre do condutor que foi calculada com a Equação 67 seja superior á área da secção transversal de cobre do condutor escolhido, observando o efeito pelicular, é necessário associar condutores em paralelo para que se possa conduzir a corrente sem superaquecimento dos

condutores do enrolamento. A quantidade de condutores em paralelo pode ser calculada através da Equação 68.

$$N_p = \frac{S_{fio}}{S_{Cu}} \quad (68)$$

Onde:

N_p : número de condutores em paralelo;

S_{Cu} : área da secção transversal do cobre, tabelado.

A última etapa no projeto de indutor consiste em verificar a total acomodação do enrolamento no interior da janela do núcleo. A janela mínima necessária para acomodar o enrolamento calculado é dada pela Equação 69.

$$A_{w_min} = \frac{N_e \cdot S_{isol} \cdot N_p}{K_w} \quad (69)$$

Onde:

A_{w_min} : área mínima da janela do núcleo;

S_{isol} : área da secção transversal do condutor incluindo o isolamento.

A possibilidade de execução do indutor (P_{ex}) é verificada através da Equação 70.

$$P_{ex} = \frac{A_{w_min}}{A_w} < 1 \quad (70)$$

Caso a Equação 70 não seja satisfeita não será possível construir o enrolamento na janela disponível, então se deve escolher um núcleo maior e fazer novamente todo o projeto.

Quando o indutor é construído em um núcleo com formato toroidal, o projeto é iniciado escolhendo o núcleo. Deve-se dar preferência ao núcleo de menor volume. Em seguida, é calculado o número de espiras com auxílio da Equação 71.

$$N_e = \sqrt{\frac{L \cdot l_c}{\mu_r \cdot \mu_o \cdot A_c}} \quad (71)$$

Onde:

l_c : comprimento do caminho magnético médio;

μ_r : permeabilidade relativa do material do núcleo;

A_c : área de seção magnética.

Através de Equação 72, determina-se o número de espiras que leva a densidade de fluxo magnético a 80% do valor de saturação.

$$N_{emaxB} = \frac{0.8 \cdot B_{sat} \cdot l_c}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot I_{Lmax}} \quad (72)$$

Onde:

N_{emaxB} : número máximo de espiras para não saturar o núcleo;

B_{sat} : densidade de fluxo de saturação.

Caso N_e seja maior que N_{emaxB} o núcleo escolhido não é adequado ao projeto, deve-se escolher o próximo núcleo de maior volume e fazer novamente os cálculos.

A área da seção transversal do cobre necessária para suportar a corrente presente nos enrolamentos do indutor é definida pela Equação 67. Com a Equação 68 é possível determinar a quantidade de condutores em paralelo, que evitam o superaquecimento do enrolamento com a circulação de corrente.

O número máximo de espiras que pode ser enrolado no núcleo atendendo ao critério de utilização da janela é dado pela Equação 73.

$$N_{emax} = \frac{K_u \cdot ID^2}{d_{isol}^2} \quad (73)$$

Onde:

N_{emax} : número máximo de espiras;

K_u : critério de utilização da janela;

ID : diâmetro interno do núcleo;

d_{isol} : diâmetro do condutor com isolamento.

Caso o número de espiras seja maior que o número máximo de espiras, deve-se escolher outro condutor de menor diâmetro, levando-se em consideração o isolamento e fazer novamente os cálculos.

3 METODOLOGIA DE PROJETO

Esta seção tem o propósito de apresentar a metodologia utilizada no desenvolvimento dos projetos dos retificadores. Primeiramente, a metodologia de projeto é desenvolvida a partir de uma lista de especificações, também são expostos os valores das principais grandezas obtidas, assim como uma tabela com os componentes utilizados na implementação prática das estruturas.

3.1 RETIFICADOR BOOST

A metodologia de projeto é desenvolvida a partir de uma lista de especificações, que está apresentada na Tabela 1. Com estas especificações é possível calcular as principais grandezas dos retificadores em estudo.

Tabela 1 – Especificações de projeto para o retificador Boost

Especificação	Valor
Tensão eficaz na entrada	127 V
Tensão de saída	250 V
Potência de saída	300 W
Frequência de comutação	20 kHz
Ondulação da tensão no capacitor	1 %
Frequência de entrada	60 Hz
Potência de entrada	330 W
Frequência de corte	4500 Hz
Coeficiente de amortecimento	0,8

Fonte: Autoria própria

Resolvendo a Equação 3, obtém-se a Equação 74 e o valor de pico da tensão na entrada.

$$V_p = 127 \cdot \sqrt{2} = 179,60 \text{ V} \quad (74)$$

Resolvendo a Equação 2, tem-se a Equação 75 e o valor da razão cíclica.

$$D \leq 1 - 0,72 = 0,28 \quad (75)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{179,60}{250} = 0,72$$

Solucionando a Equação 8, obtém-se a Equação 76 e o valor da indutância na entrada do retificador Boost.

$$L_i = \frac{179,60^2}{2\pi \cdot 20000 \cdot 300} \cdot \frac{(1-0,72)^2}{0,72} \cdot 3,12 = 294,76 \mu H \quad (76)$$

Sendo:

$$y(\alpha) = \frac{2}{0,72 \cdot \sqrt{1-0,72^2}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{0,72}{\sqrt{1-0,72^2}} \right) \right) - 2 - \frac{\pi}{0,72} = 3,12$$

Solucionando a Equação 6, tem-se a Equação 77 e a corrente de pico do indutor na entrada do retificador Boost.

$$I_{Lip} = \frac{179,60 \cdot 14,08 \cdot 10^{-6}}{294,76 \cdot 10^{-6}} = 8,88 A \quad (77)$$

Calculando a equação 12, obtém-se a Equação 78 e o valor médio da corrente no indutor L_i .

$$I_{LMED} = \frac{0,28^2 \cdot 250}{2\pi \cdot 294,76 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} \cdot \left(-\pi + \frac{2}{\sqrt{1-0,72^2}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{0,72}{\sqrt{1-0,72^2}} \right) \right) \right)$$

$$I_{LMED} = 1,97 A \quad (78)$$

Calculando a Equação 13, tem-se a Equação 79 e o valor eficaz da corrente no indutor L_i .

$$I_{IEF} = \sqrt{1,86^2 + 2,57^2} = 3,19 A \quad (79)$$

Substituindo os valores na Equação 21, obtém-se a Equação 80 e o valor médio da corrente no interruptor S.

$$I_{SMED} = \frac{179,60 \cdot 0,28^2}{\pi \cdot 20000 \cdot 294,76 \cdot 10^{-6}} = 0,77 \text{ A} \quad (80)$$

Substituindo os valores na Equação 23, tem-se a Equação 81 e o valor eficaz da corrente no interruptor S.

$$I_{SEF} = \frac{179,60 \cdot \sqrt{0,28^3}}{\sqrt{6} \cdot 20000 \cdot 294,76 \cdot 10^{-6}} = 1,86 \text{ A} \quad (81)$$

Obtém-se o valor de pico de corrente no interruptor S utilizando-se a Equação 77. A corrente média no diodo D é igual à corrente média na carga. A partir da Equação 25 tem-se a Equação 82 e a corrente eficaz no diodo D.

$$I_{DEF} = \frac{179,60}{294,76 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} \cdot \sqrt{\frac{0,28^3}{3\pi} \cdot \left(\frac{3,12}{0,72} - \frac{\pi}{2}\right)} = 2,57 \text{ A} \quad (82)$$

A partir da Equação 26, obtém-se a Equação 83 e o valor do capacitor na saída do retificador Boost.

$$C_o = \frac{250 \cdot 0,28 \cdot 0,72^2}{8\pi \cdot 294,76 \cdot 10^{-6} \cdot 20000 \cdot 60 \cdot 2,50} = 1,63 \text{ mF} \quad (83)$$

Da Equação 28 tem-se a Equação 84 e o valor médio da corrente na saída.

$$I_o = \frac{300}{250} = 1,20 \text{ A} \quad (84)$$

Para projetar o filtro na entrada é necessário obter o valor de resistência equivalente que represente o conversor, para isto é utilizado a Equação 85, que é obtida a partir da Equação 58.

$$R_{eq} = \frac{179,60^2}{2 \cdot 330} = 48,88 \Omega \quad (85)$$

Para a primeira metodologia de cálculo do filtro na entrada do retificador Boost, o valor de indutância é determinado pela Equação 86 que tem origem da Equação 59. Por meio da Equação 60 obtém-se a Equação 87 e o valor de capacitância.

$$L_{f1} = \frac{48,88}{2 \cdot \pi \cdot 4500} = 1,73 \text{ mH} \quad (86)$$

$$C_{f1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4500 \cdot 48,88} = 724 \text{ } \eta F \quad (87)$$

Para a segunda metodologia de cálculo do filtro na entrada do retificador Boost, o valor de capacitância é obtido através da Equação 88, que se originou da Equação 61. Por meio da Equação 62 tem-se a Equação 89 e o valor de indutância.

$$C_{f2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 4500 \cdot 48,88} = 452 \text{ } \eta F \quad (88)$$

$$L_{f2} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 4500)^2 \cdot 452 \cdot 10^{-9}} = 2,77 \text{ mH} \quad (89)$$

Com a metodologia de projeto desenvolvida obtêm-se os valores das grandezas que foram analisadas, esses valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores teóricos das grandezas do retificador Boost

(continua)

Grandeza	Valor
Razão cíclica máxima	0,28
Tensão de pico na entrada	179,60 V
Indutância do indutor L_i	294,76 μH
Corrente de pico no indutor L_i	8,88 A
Corrente média no indutor L_i	1,97 A
Corrente eficaz no indutor L_i	3,19 A
Corrente média no interruptor S	0,77 A
Corrente eficaz no interruptor S	1,86 A
Corrente de pico no interruptor S	8,88 A
Corrente média no diodo D	1,20 A
Corrente eficaz no diodo D	2,57 A
Capacitância do capacitor C_o	1,63 mF

Tabela 2 – Valores teóricos das grandezas do retificador Boost

Grandeza	Valor
Resistência equivalente	48,88 Ω
Indutância do filtro na entrada usando a primeira metodologia de calculo	1,73 mH
Capacitância do filtro na entrada usando a primeira metodologia de calculo	724 η F
Capacitância do filtro na entrada usando a segunda metodologia de calculo	452 η F
Indutância do filtro na entrada usando a segunda metodologia de calculo	2,77 mH

Fonte: Autoria própria

Depois de obtido os valores das grandezas dos elementos que compõem o retificador pode-se realizar a escolha dos componentes, que estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Lista de componentes do retificador Boost

Componente	Especificação
Capacitor C_o	3 x 470 μ F / 400 V
Diodo D	MUR 460 / 600 V
Transistor	65C7125 / 650 V
Capacitor filtro na entrada 1	1 μ F / 250 V
Capacitor filtro na entrada 2	470 η F / 250 V
Ponte retificadora	KBU 8M / 1000 V
Indutor L_i	297,80 μ H / núcleo E-42/21/15
Indutor filtro na entrada 1	1,27 mH / núcleo E-APH46P60
Indutor filtro na entrada 2	2,68 mH / núcleo E-APH46P60

Fonte: Autoria própria

3.2 RETIFICADOR SEPIC

A partir da lista de especificações apresentada na Tabela 4 é desenvolvida a metodologia de projeto, com estas especificações são calculadas as principais grandezas do retificador.

Tabela 4 - Especificações de projeto para o retificador SEPIC

Especificação	Valor
Tensão eficaz na entrada	127 V
Tensão na saída	250 V
Potência na saída	300 W
Frequência de comutação	20 kHz
Razão cíclica	0,28
Ondulação de tensão no capacitor C_i	40 %
Ondulação de tensão no capacitor C_o	1 %
Ondulação de corrente no indutor L_i	20 %
Frequência de entrada	60 Hz

Fonte: Autoria própria

Por intermédio da Equação 34, obtém-se a Equação 90 e o máximo valor que a razão cíclica pode assumir.

$$D \leq 1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000}{208,33 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}} = 0,80 \quad (90)$$

Foi escolhido $D=0,28$ para que os retificadores Boost e SEPIC tenham o mesmo valor de razão cíclica. Por intermédio da Equação 36, tem-se a Equação 91 e o máximo valor da corrente no indutor L_i . Através da Equação 37, obtém-se a Equação 92 e o máximo valor da corrente no indutor L_o .

$$I_{L_i max} = \frac{0,28 \cdot 179,60 \cdot [0,28 \cdot (250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} - 179,60 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6}) + 2 \cdot 250 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6}]}{2 \cdot 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000}$$

$$I_{L_i max} = 3,85 \text{ A} \quad (91)$$

$$I_{L_o max} = \frac{0,28 \cdot 179,60 \cdot [2 \cdot 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} - 0,28 \cdot (250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} - 179,60 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6})]}{2 \cdot 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000}$$

$$I_{L_o max} = 20,01 \text{ A} \quad (92)$$

Através da Equação 42, tem-se a Equação 93 e o valor médio de corrente no indutor L_i . Resolvendo a Equação 43, obtém-se a Equação 94 e o valor médio de corrente no indutor L_o .

$$I_{L_i med} = \frac{0,28^2 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{\pi \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 2,13 A \quad (93)$$

$$I_{L_o med} = \frac{0,28^2 \cdot 179,60^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{4 \cdot 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 1,20 A \quad (94)$$

Resolvendo a Equação 44, tem-se a Equação 95 e o valor eficaz da corrente no indutor L_i . Solucionando a Equação 45, obtém-se a Equação 98 e o valor eficaz da corrente no indutor L_o . Para ter melhor visualização do cálculo, a Equação 98 foi dividida em duas partes, sendo formada pela Equação 96 e pela Equação 97.

$$I_{L_i ef} = \frac{\sqrt{6}}{24} \cdot \sqrt{\frac{0,28^3 \cdot 179,60^2 \cdot [12 \cdot 250^2 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,28 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6}) + (108,41 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (16 \cdot 250^2 - 9 \cdot 179,60^2 \cdot 0,28^2)]}{250^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (108,41 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 20000^2}}$$

$$I_{L_i ef} = 2,37 A \quad (95)$$

$$I_{L_o ef1} = \frac{1}{24} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,28^3 \cdot 179,60^2}{250^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (108,41 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 20000^2 \cdot \pi}} \quad (96)$$

$$I_{L_o ef2} = \sqrt{\left(\begin{array}{l} 128 \cdot 179,60 \cdot 250 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 - 192 \cdot 179,60 \cdot 250 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,28 \\ + 54 \cdot 179,60^2 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 0,28\pi + 48 \cdot 250^2 (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \\ - 36 \cdot 250^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,28\pi - 27 \cdot 179,60^2 \cdot (108,41 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,28\pi \end{array} \right)} \quad (97)$$

$$I_{L_o ef} = I_{L_o ef1} + I_{L_o ef2} = 5,37 A \quad (98)$$

Solucionando a Equação 46, tem-se a Equação 99 e o valor de indutância do indutor L_i . Calculando a Equação 47 obtém-se a Equação 100 e o valor de indutância do indutor L_o .

$$L_i = \frac{179,60 \cdot 0,28}{0,67 \cdot 20000} = 3,76 mH \quad (99)$$

$$L_o = \frac{3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 208,33 \cdot 179,60^2 \cdot 0,28^2}{4 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 250^2 \cdot 20000 - 208,33 \cdot 179,60^2 \cdot 0,28^2} = 108,41 \mu H \quad (100)$$

Calculando a Equação 48, tem-se a Equação 101 e o valor máximo de corrente no interruptor S.

$$I_{Smax} = \frac{0,28 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 23,86 A \quad (101)$$

Substituindo os valores na Equação 49, obtém-se a Equação 102 e o valor médio de corrente no interruptor S.

$$I_{SMED} = \frac{0,28^2 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{\pi \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 2,13 A \quad (102)$$

Substituindo os valores na Equação 50, tem-se a Equação 103 e o valor eficaz da corrente no interruptor S.

$$I_{SEF} = \frac{0,28 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} \cdot \sqrt{\frac{0,28}{6}} = 5,15 A \quad (103)$$

A partir da Equação 51, obtém-se a Equação 104 e o valor de capacitância do capacitor C_i . Da Equação 52 tem-se a Equação 105 e o valor de capacitância do capacitor C_o .

$$C_i = \frac{0,28^2 \cdot 179,60 \cdot [0,28 \cdot (179,60 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} - 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3}) + 2 \cdot 250 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3}]^2}{4 \cdot 250^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 71,84 \cdot 20000^2} = 3,36 \mu F \quad (104)$$

$$C_o = \frac{300}{2\pi \cdot 60 \cdot 2,5 \cdot 250} = 1,27 mF \quad (105)$$

O valor médio de corrente no diodo D é igual ao valor médio de corrente no indutor L_o , definido pela Equação 94. A partir da Equação 53, obtém-se a Equação 106 e o valor eficaz de corrente no diodo D.

$$I_{DEF} = \frac{2 \cdot 0,28 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{3 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} \cdot \sqrt{\frac{0,28 \cdot 179,60}{\pi \cdot 250}} = 4,02 A \quad (106)$$

Da Equação 54, tem-se a Equação 107 e o valor máximo de corrente no diodo D.

$$I_{DMAX} = \frac{0,28 \cdot 179,60 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})}{3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 23,86 \text{ A} \quad (107)$$

O valor médio de corrente na saída do conversor é igual ao valor médio de corrente no diodo D, que por sua vez é equivalente ao valor médio de corrente no indutor L_o , conforme a Equação 94. Substituindo os valores na Equação 55 obtém-se a Equação 108, sendo outra maneira de determinar o valor médio de corrente na saída do conversor SEPIC.

$$I_o = \frac{300}{250} = 1,20 \text{ A} \quad (108)$$

Através da Equação 56, tem-se a Equação 109 e o valor mínimo de resistência na saída do conversor SEPIC.

$$R_o \geq \frac{2 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} \cdot 108,41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000}{(1-0,28)^2 \cdot (3,76 \cdot 10^{-3} + 108,41 \cdot 10^{-6})} = 16,26 \Omega \quad (109)$$

Depois de desenvolvida a metodologia de projeto, os valores das grandezas analisadas são obtidos e apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores teóricos das grandezas do retificador SEPIC

(continua)

Grandeza	Valor
Razão cíclica máxima	0,80
Corrente de pico no indutor L_i	3,85 A
Corrente de pico no indutor L_o	20,01 A
Corrente média no indutor L_i	2,13 A
Corrente média no indutor L_o	1,20 A
Corrente eficaz no indutor L_i	2,37 A
Corrente eficaz no indutor L_o	5,37 A
Indutância de L_i	3,76 mH
Indutância de L_o	108,41 μ H
Corrente de pico no interruptor S	23,86 A

Tabela 5 – Valores teóricos das grandezas do retificador SEPIC**(conclusão)**

Grandeza	Valor
Corrente média no interruptor S	2,13 A
Corrente eficaz no interruptor S	5,15 A
Capacitância de C_i	3,36 μ F
Capacitância de C_o	1,27 mF
Corrente média no diodo D	1,20 A
Corrente eficaz no diodo D	4,02 A
Corrente de pico no diodo D	23,86 A
Corrente média na saída	1,20 A
Resistência mínima na saída	16,26 Ω

Fonte: Autoria própria

Com posse dos valores das grandezas dos elementos que compõem o retificador, são selecionados seus componentes e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Lista de componentes do retificador SEPIC

Componente	Especificação
Capacitor C_o	3 x 470 μ F / 400 V
Diodo D	MUR 460 / 600 V
Transistor	65C7125 / 650 V
Capacitor C_i	2,7 μ F / 800 V
Indutor L_i	3,77 mH / núcleo E-APH46P60
Indutor L_o	108,46 μ H / núcleo E-42/21/15
Ponte retificadora	KBU 8M / 1000 V

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica foi realizada com o *software* PSIM, usando os mesmos valores dos componentes que foram utilizados na construção dos conversores. Assim é possível ter uma prévia comprovação dos resultados que são esperados na experimentação, validando o equacionamento e projeto dos elementos que compõem as estruturas.

A simulação numérica considera a modelagem ideal dos componentes. Os resultados apresentados estão em regime permanente, uma vez que não são abordadas as características do regime transitório.

A Figura 11 apresenta o circuito eletrônico do retificador Boost. Nela são indicadas as grandezas que foram medidas por simulação numérica, posteriormente nos testes realizados em laboratório.

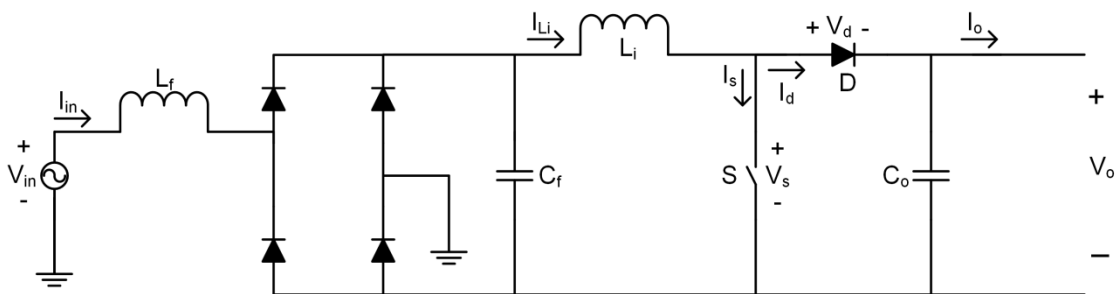


Figura 11 - Retificador Boost com indicação das grandezas mensuradas
Fonte: Autoria própria

4.1 RETIFICADOR BOOST USANDO A PRIMEIRA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA

Por intermédio da Figura 12 é representada a corrente e a tensão na entrada. A corrente na entrada é multiplicada por um fator de 40 unidades, para proporcionar melhor visibilidade da corrente em relação a tensão. É possível constatar que a corrente e a tensão estão em fase, caracterizando um elevado fator de potência. Observa-se também que a corrente não possui o formato de uma senoide pura, apresentando uma TDH de 28,79 %.

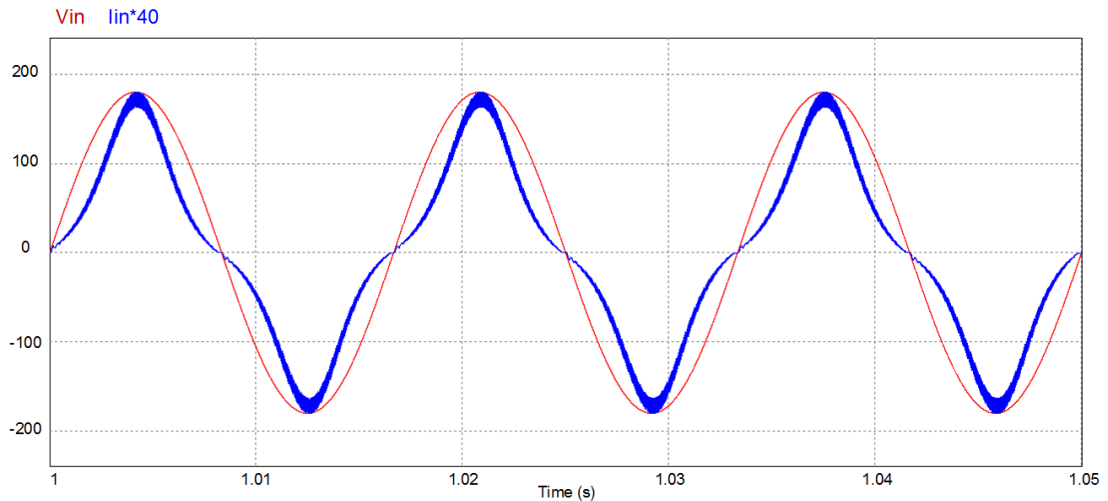


Figura 12 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Através da Figura 13 pode-se observar o detalhe de ondulação da corrente na entrada com a frequência de 20 kHz. Esta forma de onda foi retirada no pico de corrente onde a ondulação é maior. O valor desta ondulação é de aproximadamente 440 mA.

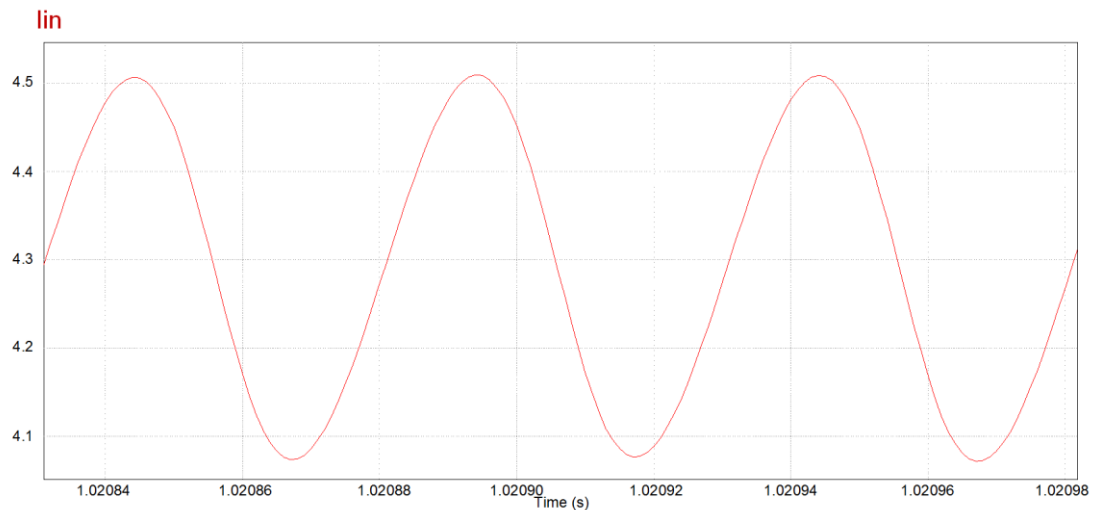


Figura 13 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no indutor L_i é apresentada através da Figura 14. A corrente possui envoltória senoidal com ondulação de 20 kHz, o valor máximo desta ondulação é de 9,32 A.

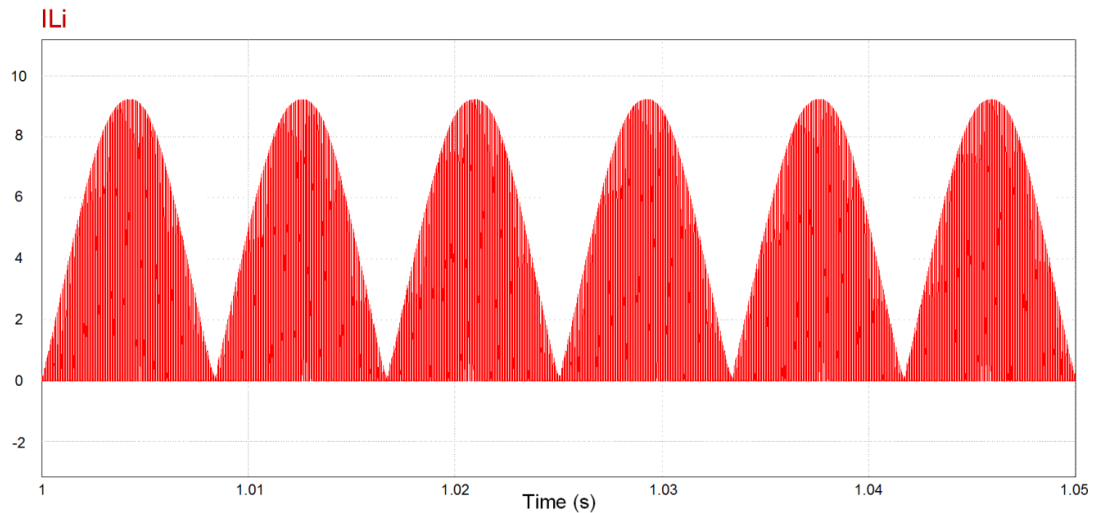


Figura 14 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

A Figura 15 mostra o detalhe de ondulação da corrente no indutor L_i com a frequência de 20 kHz. Esta forma de onda foi retirada onde ocorre o valor máximo de corrente, porque este é o ponto mais crítico de maneira a garantir que o conversor sempre opera no MCD.

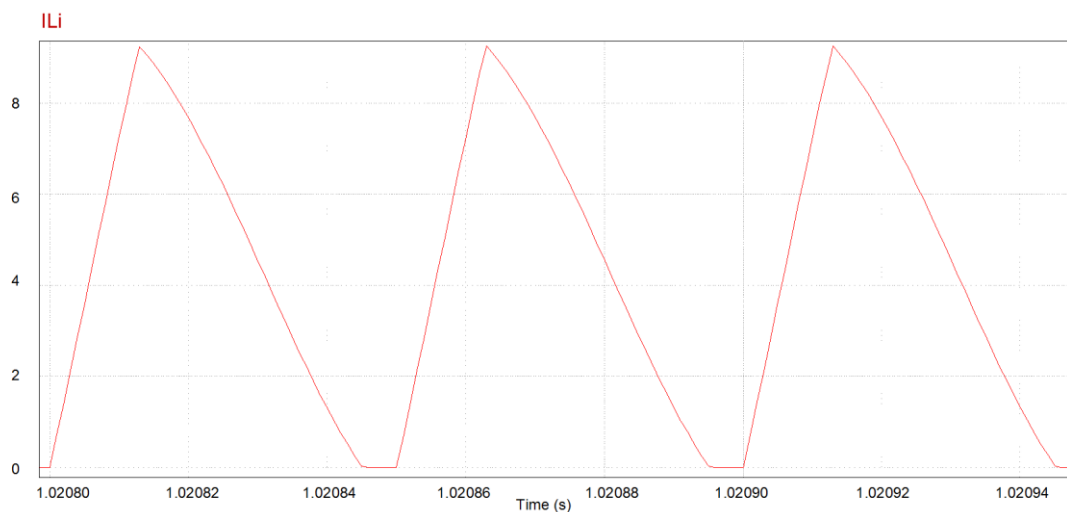


Figura 15 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da tensão no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 kHz são expostos sequencialmente na Figura 16 e na Figura 17, nota-se que a máxima amplitude da tensão é de 252,04 V.

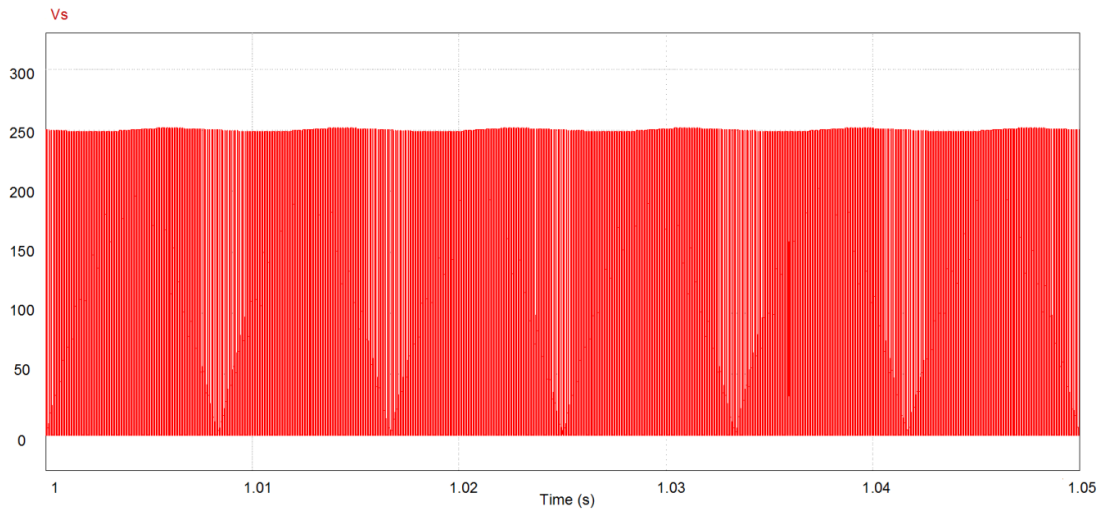


Figura 16 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

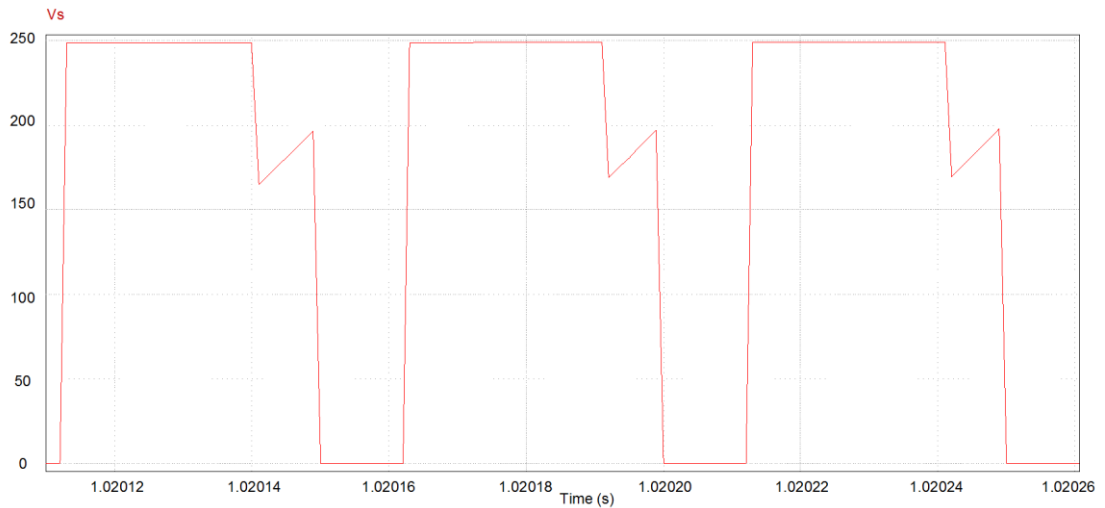


Figura 17 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Na Figura 18 e na Figura 19 são mostradas as formas de onda da corrente no interruptor S com seu detalhe de ondulação em alta frequência, respectivamente. Verifica-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 9,26 A.

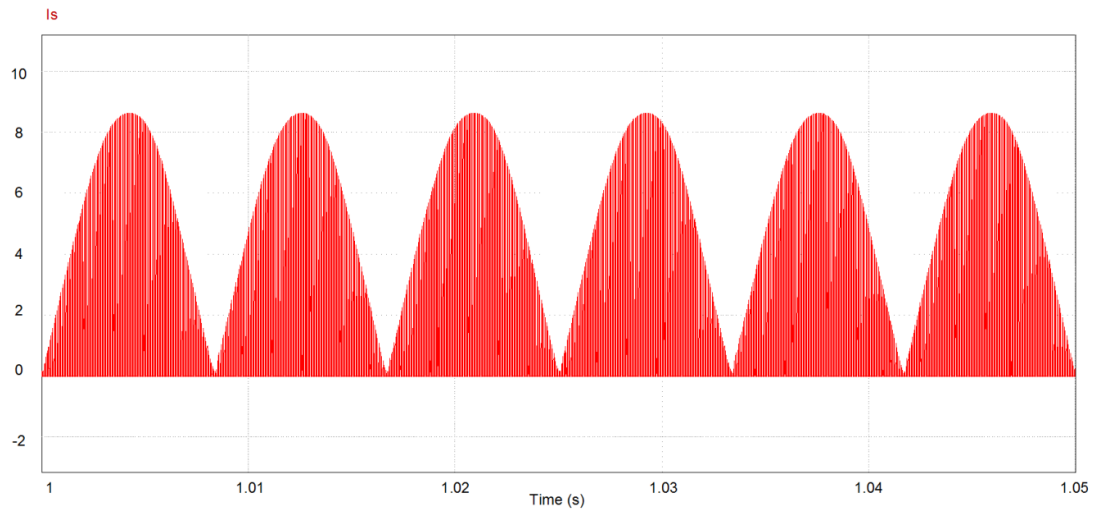


Figura 18 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

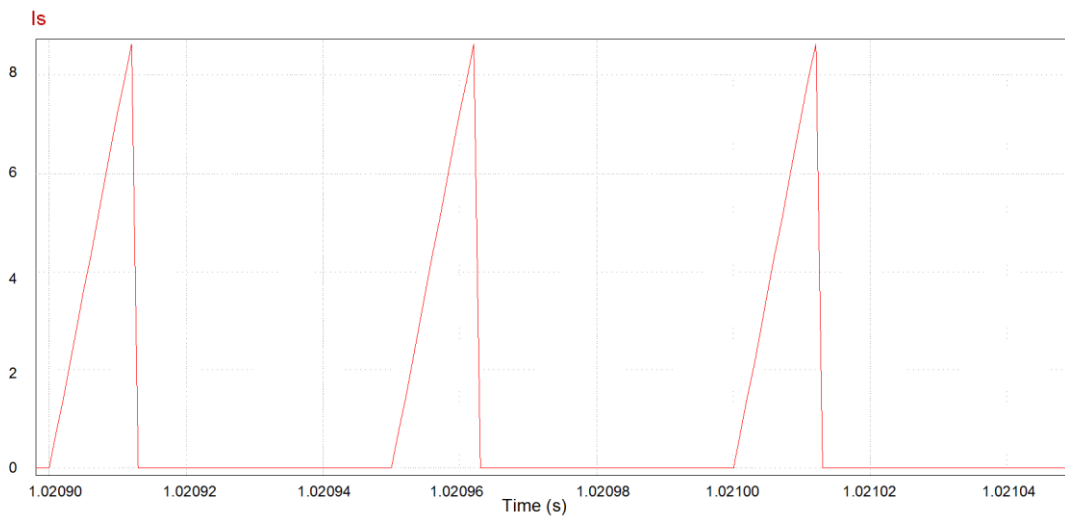


Figura 19 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 20 e da Figura 21 estão representadas sequencialmente, as formas de onda da tensão no diodo D com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Verifica-se que a máxima amplitude da tensão em módulo é de 252,02 V.

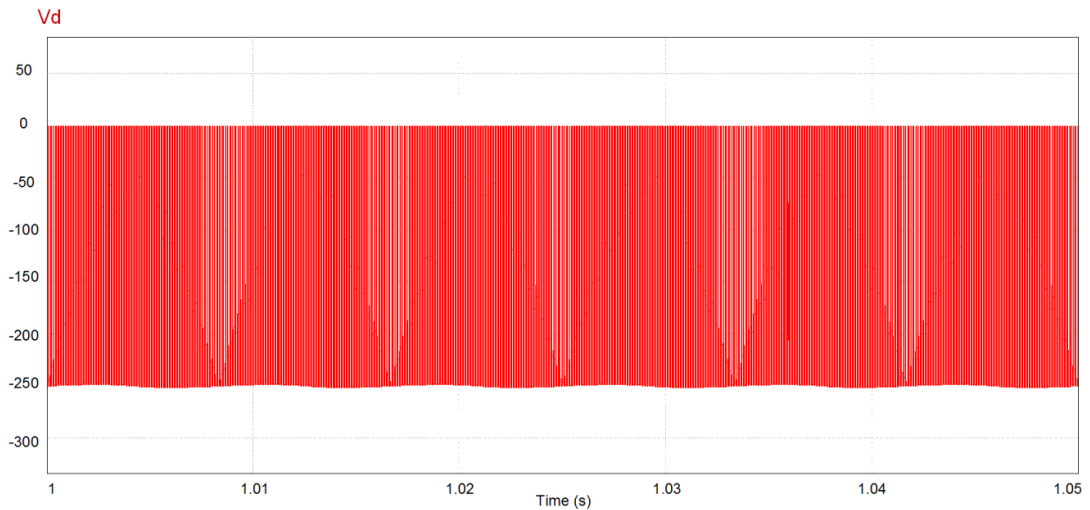


Figura 20 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

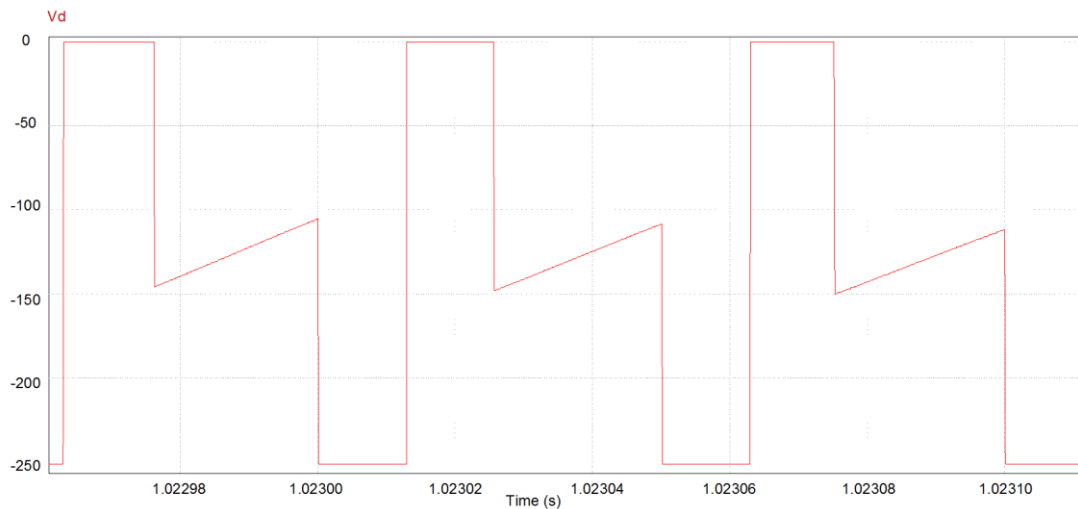


Figura 21 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

As formas de onda da corrente no diodo D, com seu detalhe de ondulação em alta frequência são apresentados respectivamente na Figura 22 e na Figura 23. Consta-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 9,32 A.

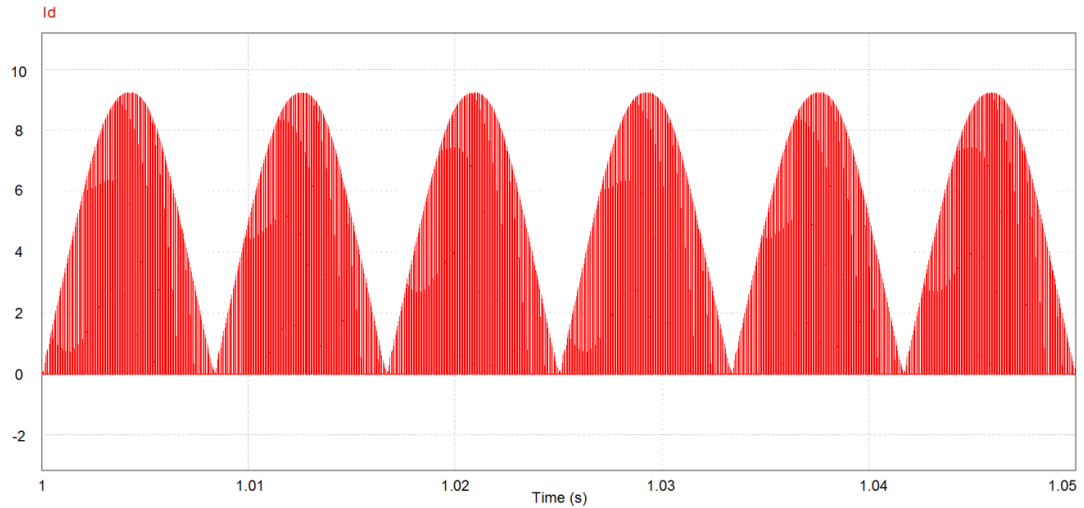


Figura 22 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

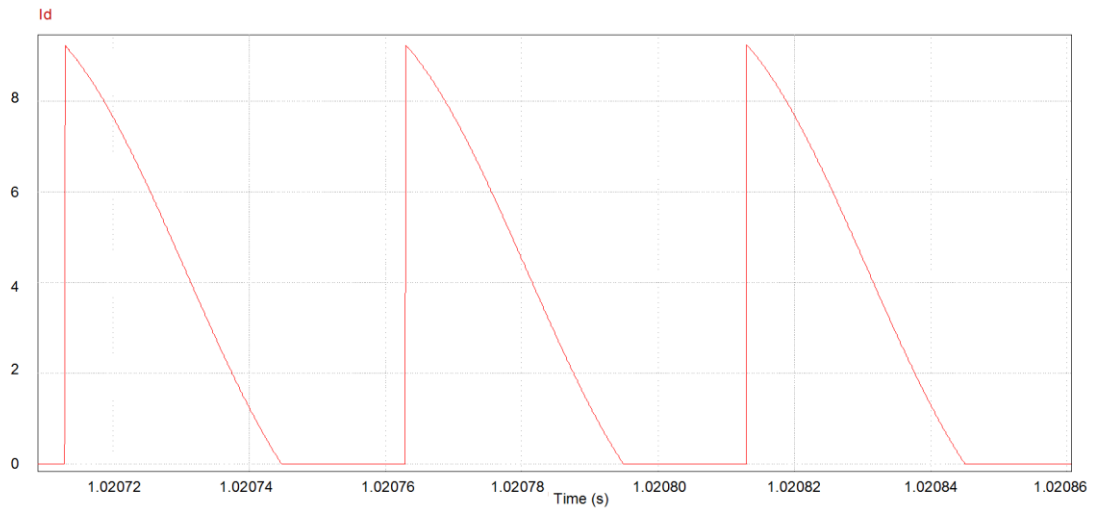


Figura 23 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Por fim, tem-se na Figura 24 o resultado obtido na saída do conversor, ou seja, corrente e tensão entregues à carga. A forma de onda da corrente foi multiplicada por um fator de 200 unidades, com a intenção de proporcionar melhor visibilidade da corrente em relação à tensão.

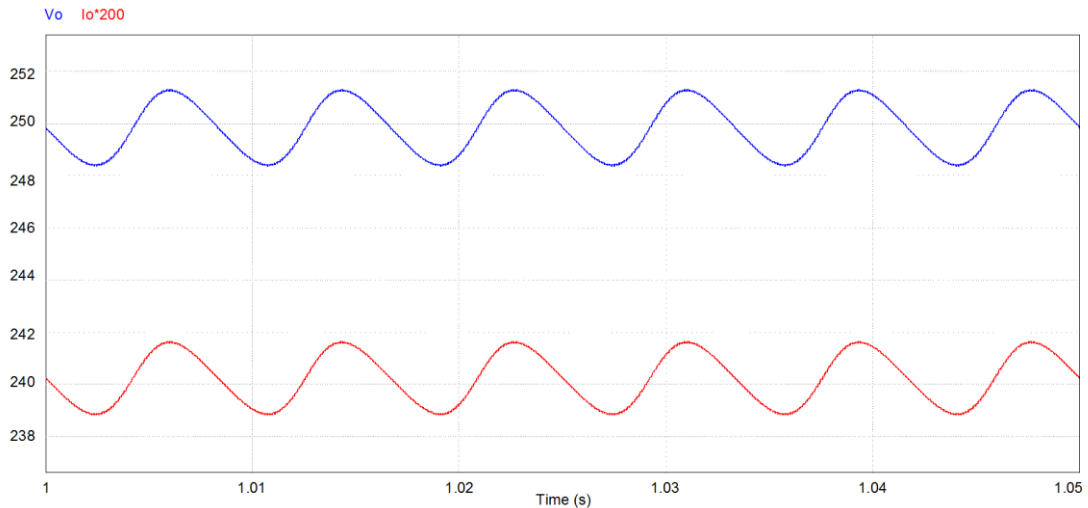


Figura 24 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Na Tabela 7 são apresentados os valores eficazes e máximos das grandezas mensuradas através de simulação numérica. Observa-se que os valores obtidos por meio de simulação numérica são muito semelhantes com os valores teóricos, a pequena diferença que existe nestes valores ocorre devido a inserção de um indutor e um capacitor no filtro na entrada do retificador. As maiores diferenças de valores ocorrem nas medições da corrente máxima no indutor L_i e da corrente máxima no diodo D com 4,95 % de erro, já na saída do retificador, os valores simulados e teóricos são praticamente iguais.

Tabela 7 - Valores das grandezas obtidos através de simulação numérica do retificador Boost Filtro 1

Grandeza	Valor teórico	Valor simulado	Erro (%)
Corrente máxima no indutor L_i	8,88 A	9,32 A	4,95
Corrente eficaz no indutor L_i	3,19 A	3,26 A	2,19
Corrente máxima no interruptor S	8,88 A	9,26 A	4,28
Corrente eficaz no interruptor S	1,86 A	1,93 A	3,76
Tensão máxima no interruptor S	251,25 V	252,04 V	0,31
Corrente máxima no diodo D	8,88 A	9,32 A	4,95
Corrente eficaz no diodo D	2,57 A	2,63 A	2,33
Tensão máxima no diodo D (em módulo)	251,25 V	252,02 V	0,31
Corrente média na saída	1,20 A	1,20 A	0
Tensão média na saída	250 V	250,58 V	0,23

Fonte: Autoria própria

4.2 RETIFICADOR BOOST USANDO A SEGUNDA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA

Por mais que seja utilizada outra metodologia de cálculo para o filtro na entrada, obtendo-se valores diferentes para seus componentes, os resultados de simulação numérica do conversor são basicamente iguais. Ocorre apenas a mudança de alguns valores de suas grandezas, permanecendo com a mesma forma de onda. Desta maneira, torna-se necessário somente apresentar os resultados de simulação numérica do retificador, inerente aos valores eficazes e máximos de suas principais grandezas, por intermédio da Tabela 8.

Através da Tabela 8 verifica-se que existe pouca diferença entre os valores obtidos por meio de simulação numérica com os valores teóricos, esta diferença ocorre devido a inserção de um indutor e um capacitor no filtro da entrada do retificador. Usando a segunda metodologia de projeto do filtro na entrada do retificador tem-se um indutor com maior valor de indutância, resultando numa desigualdade maior entre os valores das grandezas obtidos por simulação numérica como os valores teóricos, quando comparado com a primeira metodologia de projeto do filtro na entrada do retificador. As maiores diferenças de valores das grandezas ocorrem nas medições da corrente máxima no indutor L_i e da corrente máxima no diodo D com 19,03 % de erro, já na saída do retificador, os valores simulados e teóricos são praticamente iguais.

Tabela 8 - Valores das grandezas obtidos por meio de simulação numérica do retificador Boost Filtro 2

Grandeza	Valor teórico	Valor simulado	Erro (%)
Corrente máxima no indutor L_i	8,88 A	10,57 A	19,03
Corrente eficaz no indutor L_i	3,19 A	3,48 A	9,09
Corrente máxima no interruptor S	8,88 A	10,47 A	17,91
Corrente eficaz no interruptor S	1,86 A	2,01 A	8,06
Tensão máxima no interruptor S	251,25 V	251,85 V	0,24
Corrente máxima no diodo D	8,88 A	10,57 A	19,03
Corrente eficaz no diodo D	2,57 A	2,82 A	9,73
Tensão máxima no diodo D (em módulo)	251,25 V	251,83 V	0,23
Corrente média na saída	1,20 A	1,20 A	0
Tensão média na saída	250 V	250,33 V	0,13

Fonte: Autoria própria

4.3 RETIFICADOR SEPIC

Na Figura 25 é mostrado o circuito eletrônico do retificador SEPIC. Nesta figura, estão indicadas as grandezas que foram medidas por meio de simulação numérica, posteriormente nos testes realizados em laboratório.

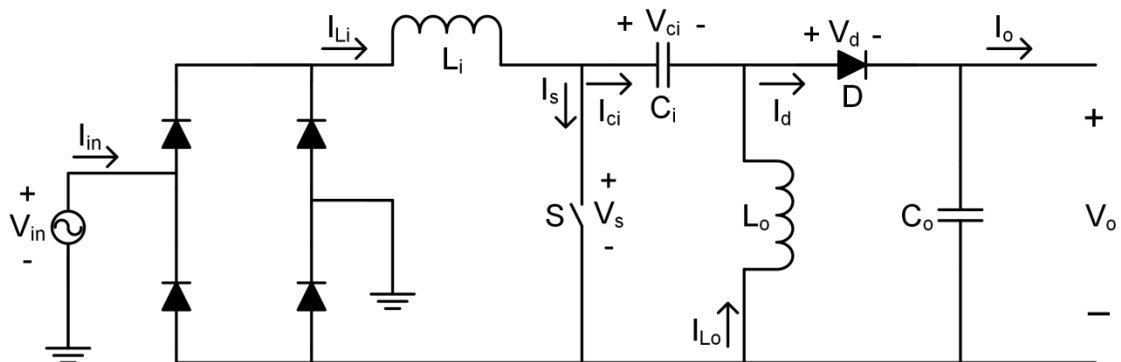


Figura 25 - Retificador SEPIC com indicação das grandezas mensuradas
Fonte: Autoria própria

São expostas as formas de ondas da corrente e da tensão na entrada do retificador por intermédio da Figura 26. A corrente é multiplicada por um fator de 40 unidades, para proporcionar melhor visibilidade dela em relação à tensão. Pode-se observar que a corrente possui um formato senoidal e está em fase com a tensão, proporcionando um elevado fator de potência.

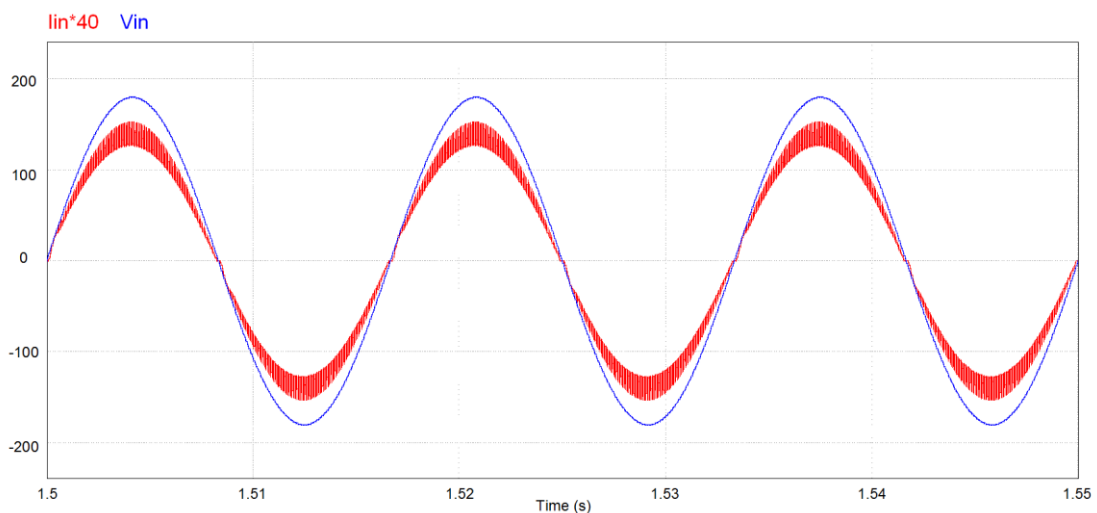


Figura 26 - Corrente e tensão na entrada do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Na figura 27 pode-se observar o detalhe de ondulação da corrente na entrada com frequência de 20 kHz. No pico da corrente na entrada, onde possui maior ondulação, o valor é de 642 mA.

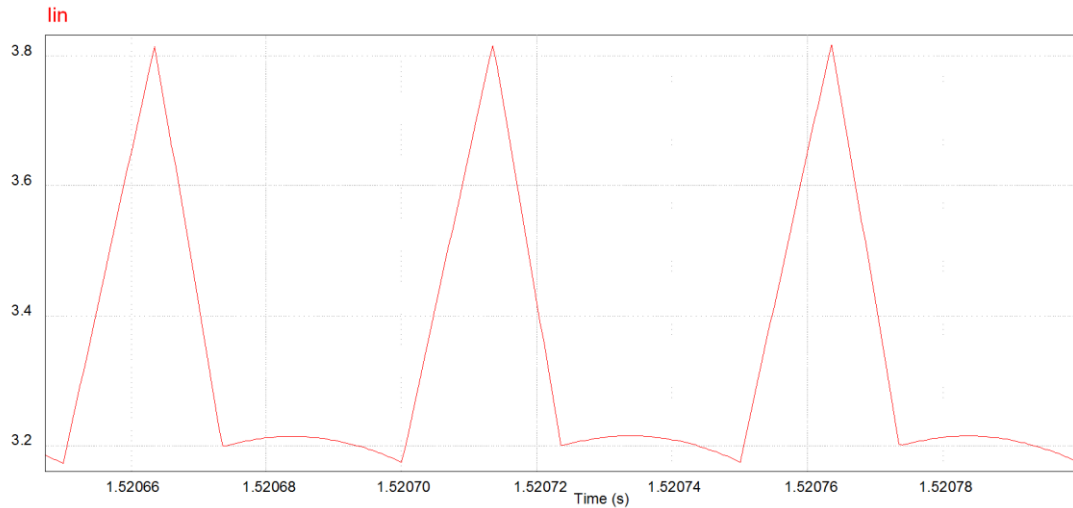


Figura 27 - Ondulação da corrente na entrada do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Na Figura 28 e na Figura 29 são apresentadas respectivamente, a corrente no indutor L_i com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Constata-se que a corrente possui um formato senoidal com valor máximo de 3,82 A.

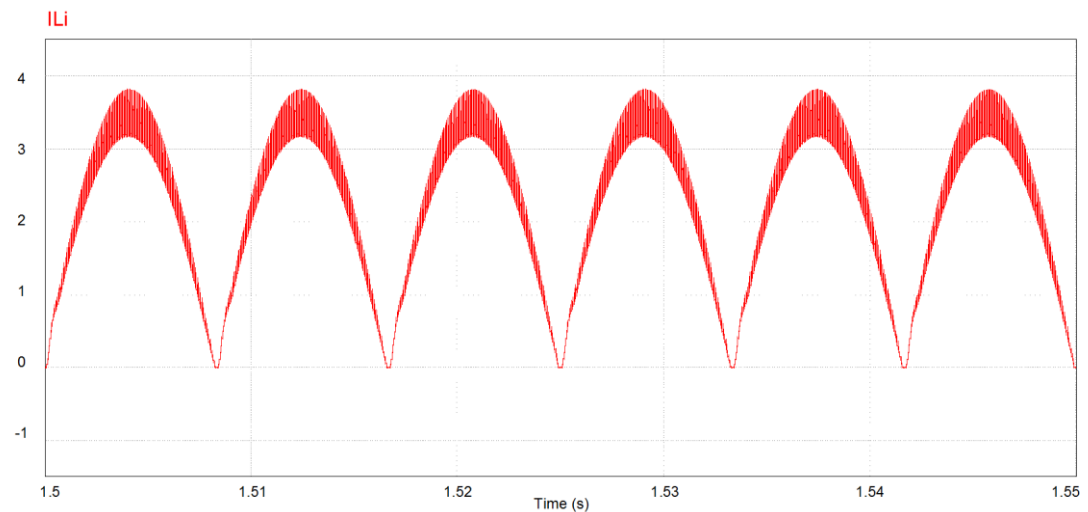


Figura 28 - Corrente no indutor L_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

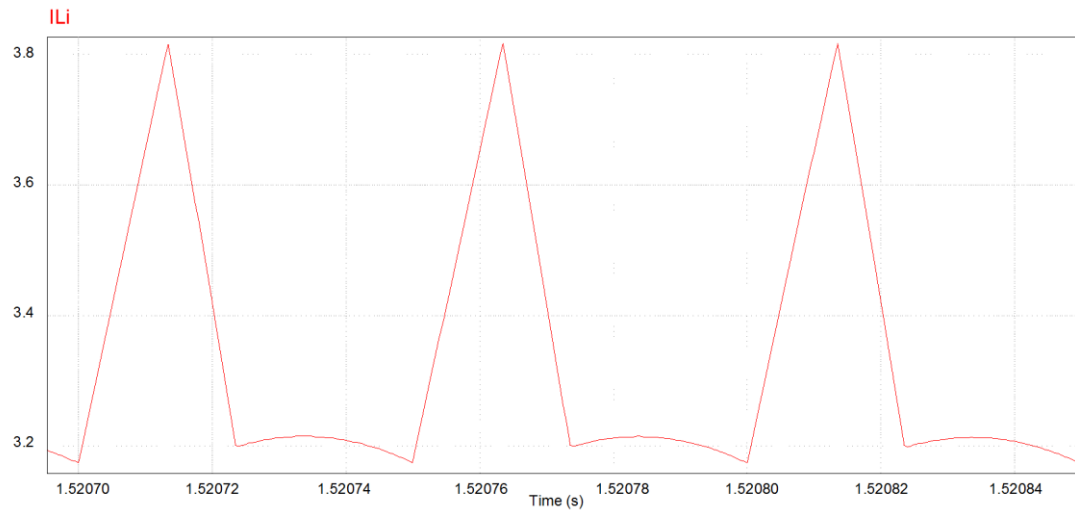


Figura 29 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da tensão no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 k Hz são apresentados na Figura 30 e na Figura 31 respectivamente. Nota-se que o máximo valor da tensão medida é de 418,29 V.

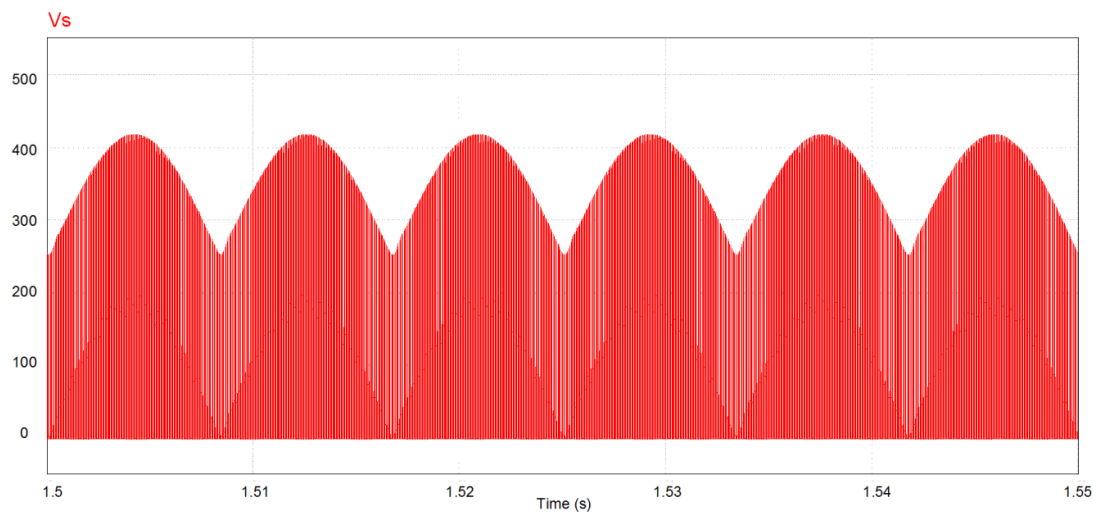


Figura 30 - Tensão no interruptor S do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

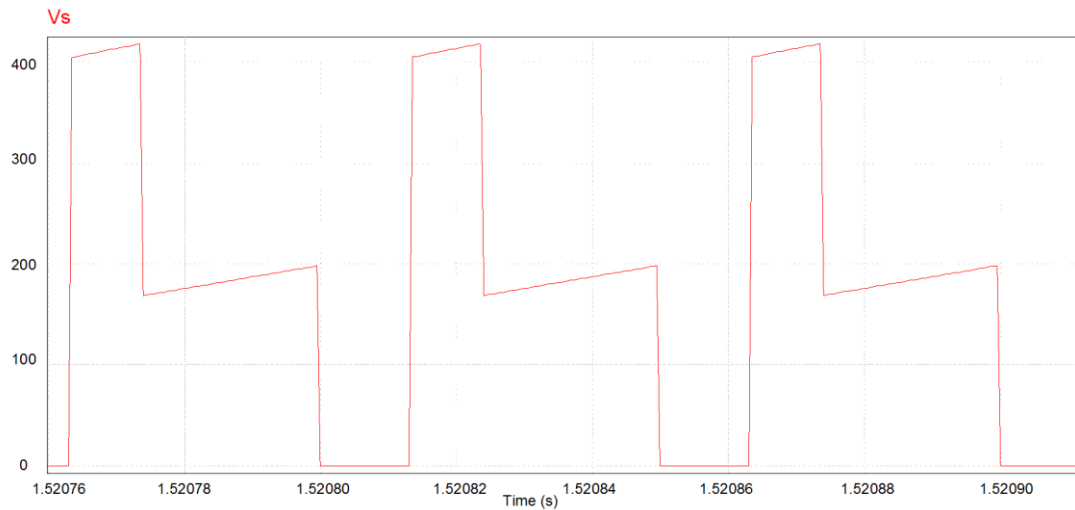


Figura 31 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no interruptor S com seu detalhe de ondulação em alta frequência estão representados sequencialmente na Figura 32 e Figura 33. Percebe-se que a corrente apresenta envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 23,76 A.

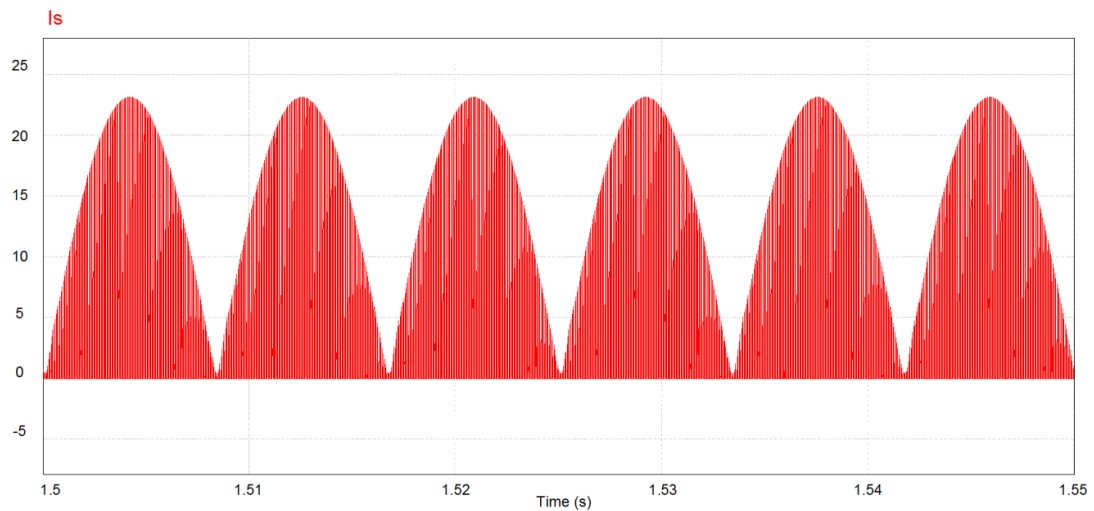


Figura 32 - Corrente no interruptor S do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

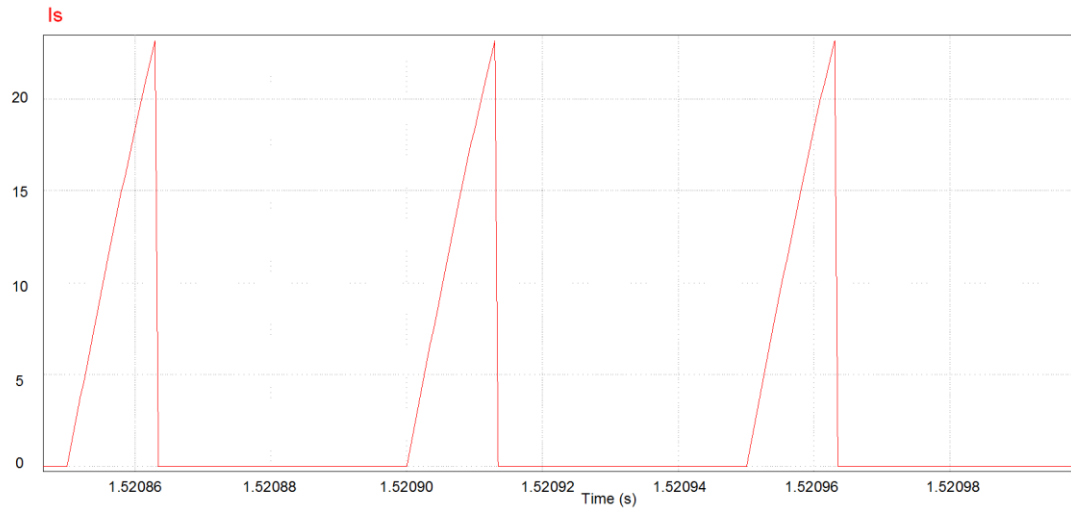


Figura 33 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a forma de onda da tensão no capacitor C_i com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Observa-se que a tensão possui um formato senoidal com valor máximo de 200,45 V.

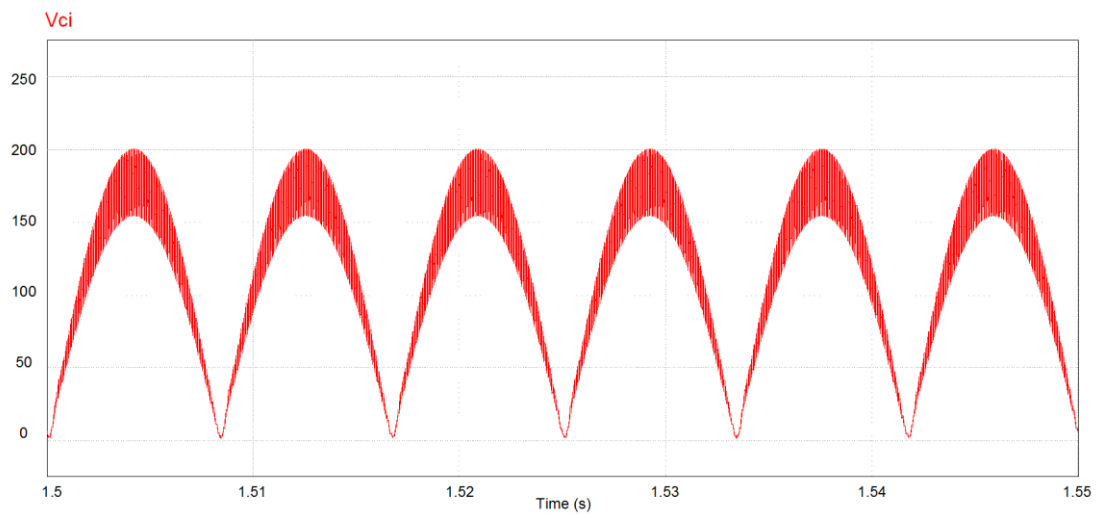


Figura 34 - Tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

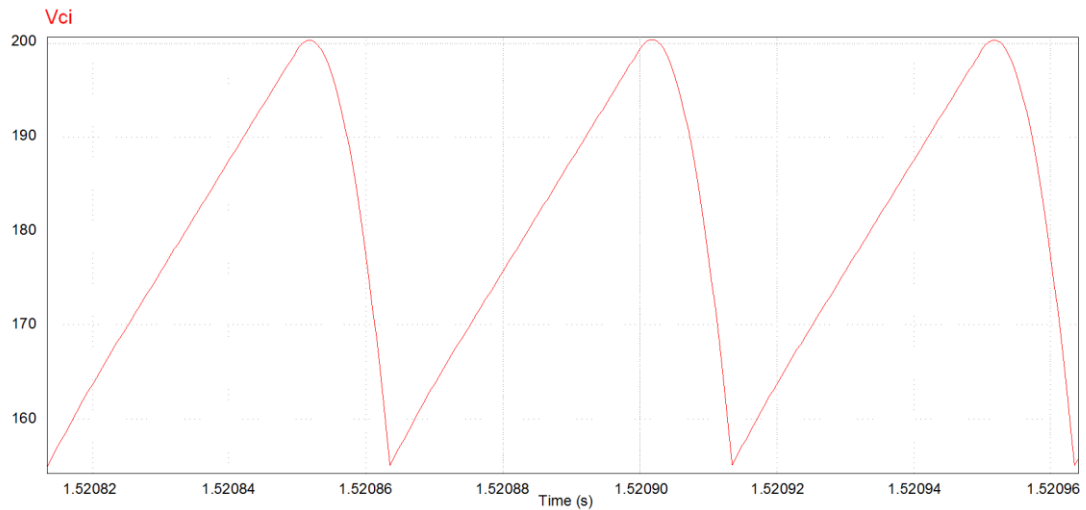


Figura 35 - Ondulação da tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

As formas de ondas apresentadas na Figura 36 e na Figura 37 correspondem a corrente no capacitor C_i com seu detalhe de ondulação em alta frequência. Observa-se que a corrente possui uma envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo (em módulo) de 19,95 A.

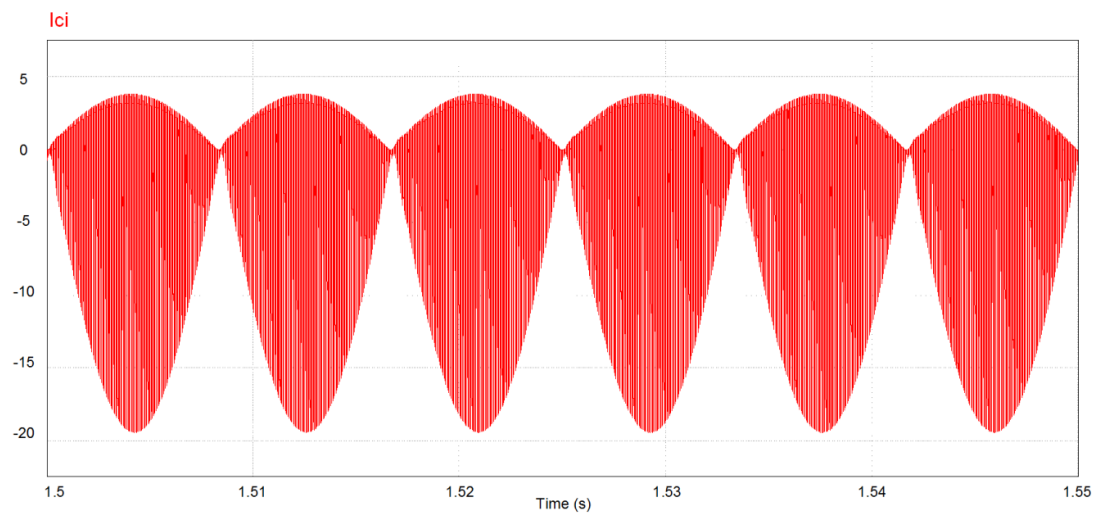


Figura 36 - Corrente no capacitor C_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

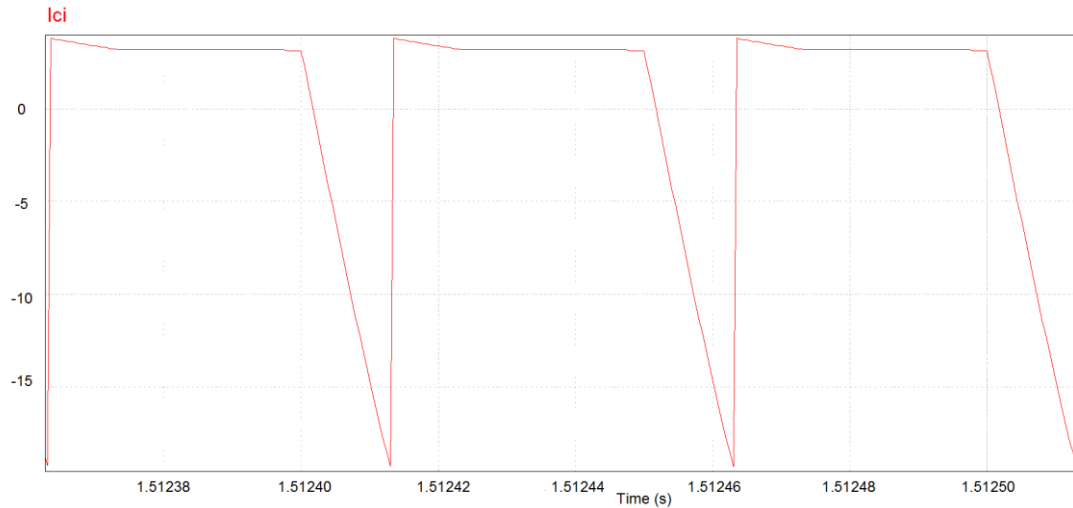


Figura 37 - Ondulação da corrente no capacitor C_1 do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A Figura 38 e a Figura 39 mostram a forma de onda da corrente no indutor L_o com seu detalhe de ondulação em alta frequência. Percebe-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 19,99 A.

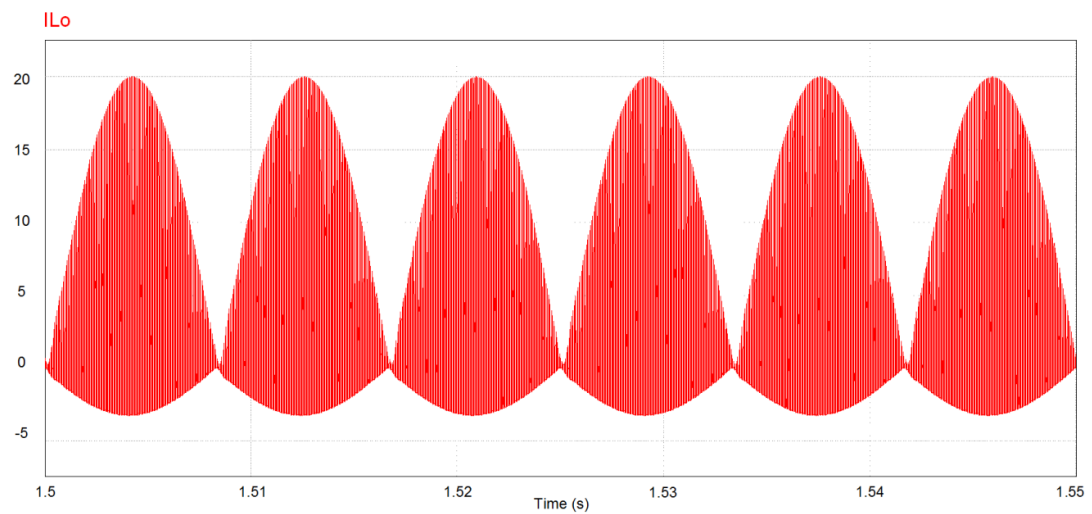


Figura 38 - Corrente no indutor L_o do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

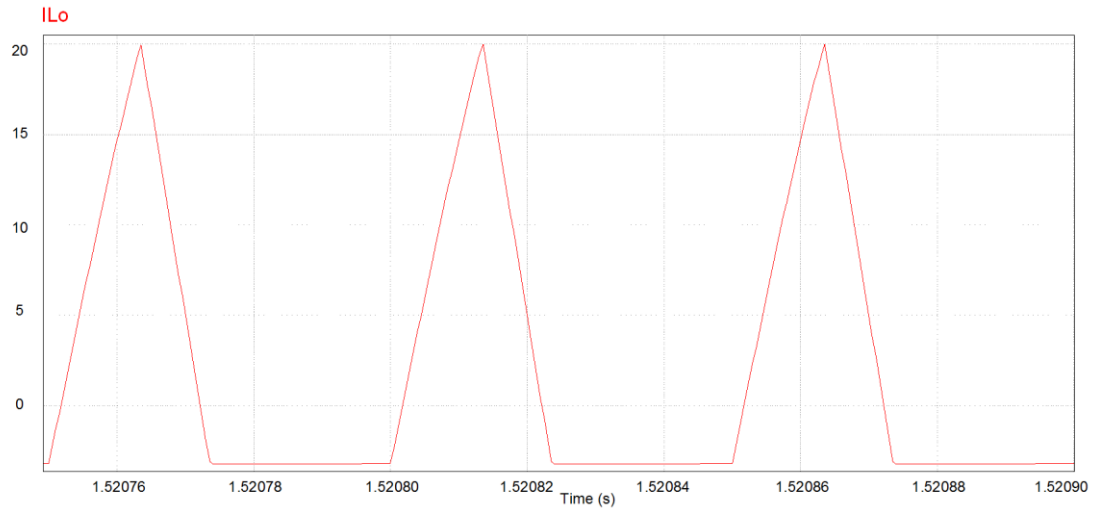


Figura 39 - Ondulação da corrente no indutor L_o do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A Figura 40 e a Figura 41 apresentam a forma de onda da tensão no diodo D com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Nota-se que o valor máximo da tensão reversa é de 450,66 V.

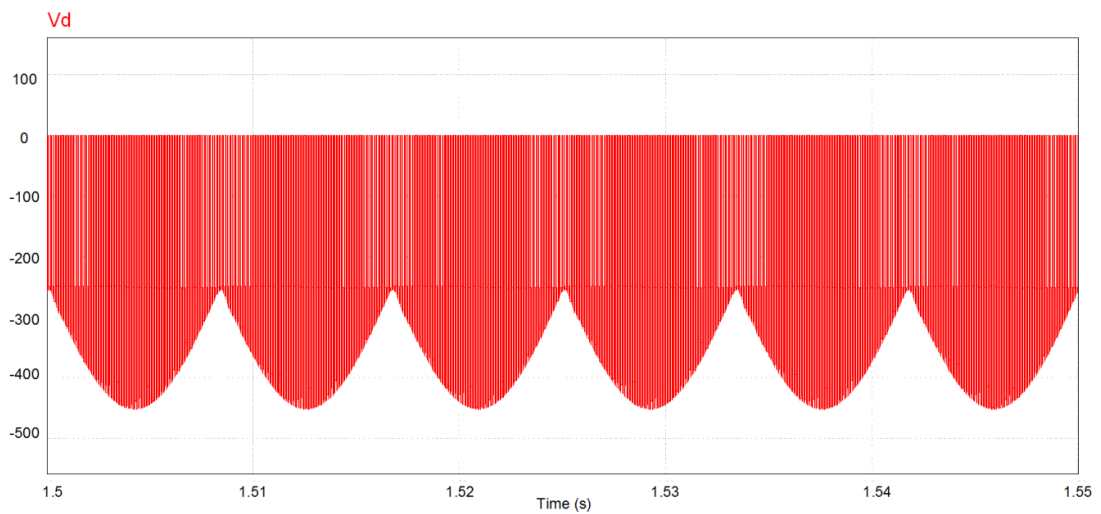


Figura 40 - Tensão no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

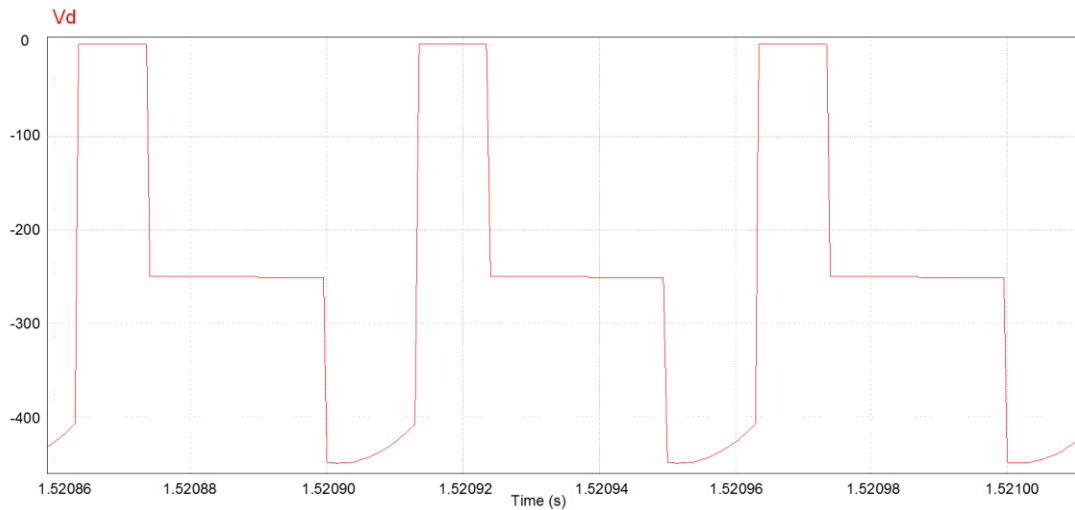


Figura 41 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 42 e da Figura 43 é apresentada a forma de onda da corrente no diodo D com seu detalhe de ondulação em alta frequência. Constata-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 23,80 A.

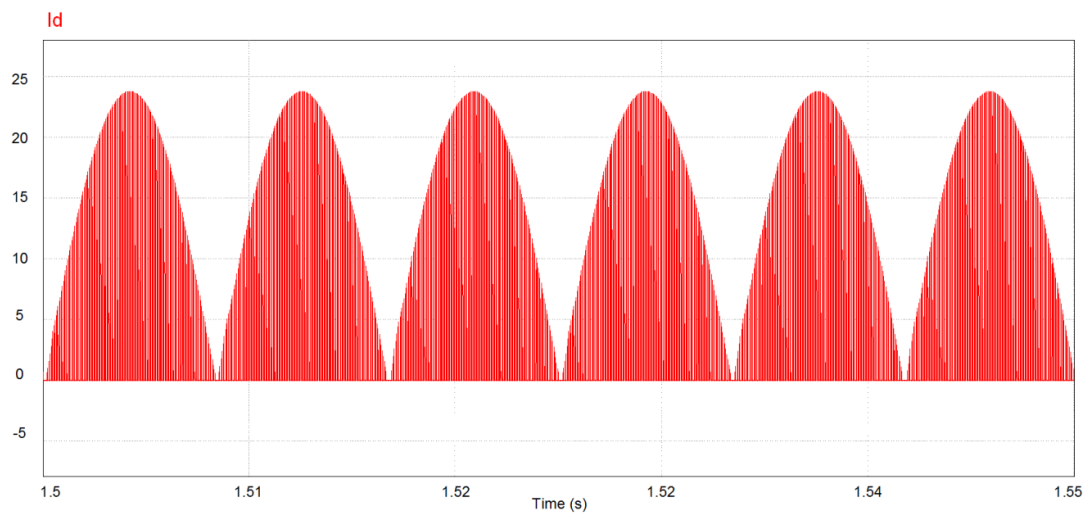


Figura 42 - Corrente no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

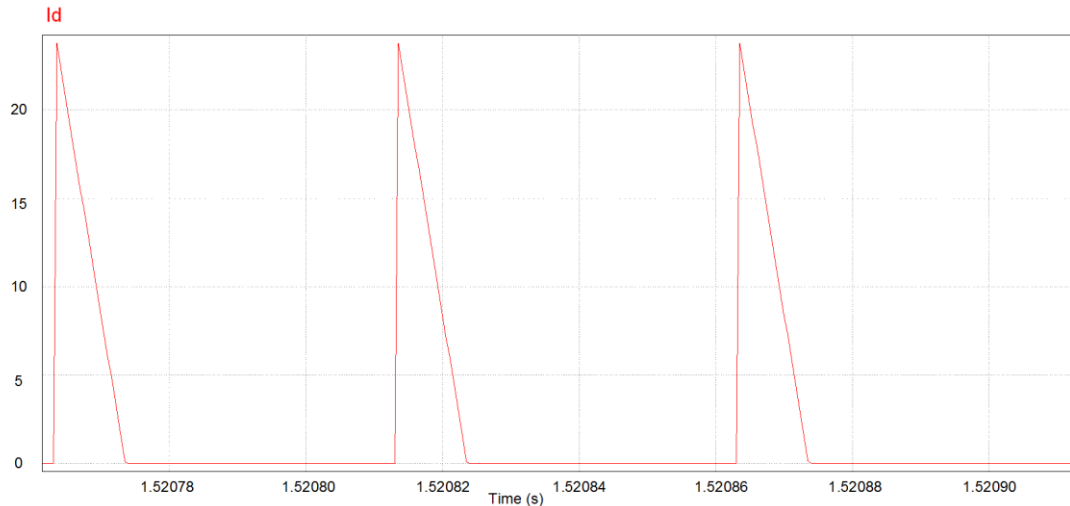


Figura 43 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Por fim, pode ser visualizado na Figura 44 o resultado obtido na saída do conversor, ou seja, corrente e tensão entregues à carga. A forma de onda da corrente foi multiplicada por um fator de 200 unidades, com a intenção de proporcionar melhor visibilidade da corrente em relação à tensão.

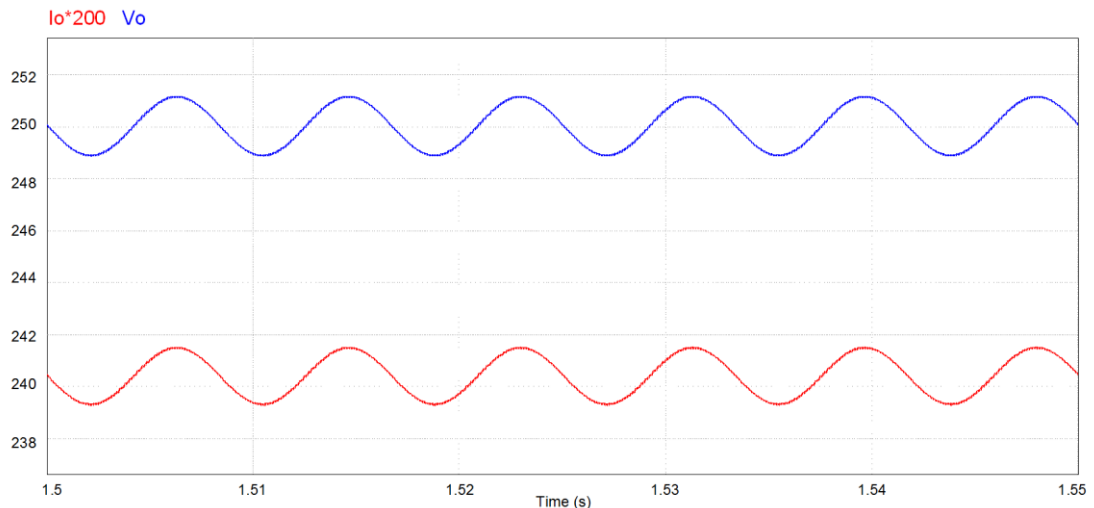


Figura 44 - Corrente e tensão na saída do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A Tabela 9 apresenta os valores eficazes e máximos das grandezas mensuradas por meio de simulação numérica. Observa-se que os valores obtidos por meio de simulação numérica são muito semelhantes com os valores teóricos. A maior diferença de valores ocorre na medição da tensão máxima no capacitor C_i

com 7 % de erro. Já na saída do retificador, os valores simulados e teóricos são praticamente iguais.

Tabela 9 - Valores das grandezas adquiridos por simulação numérica do retificador SEPIC

Grandeza	Valor teórico	Valor simulado	Erro (%)
Corrente máxima na entrada	3,85 A	3,82 A	0,78
Corrente eficaz na entrada	2,37 A	2,37 A	0
Corrente máxima no indutor L_i	3,85 A	3,82 A	0,78
Corrente eficaz no indutor L_i	2,37 A	2,37 A	0
Corrente máxima no interruptor S	23,86 A	23,76 A	0,42
Corrente eficaz no interruptor S	5,15 A	5,21 A	1,17
Tensão máxima no interruptor S	429,60 V	418,29 V	2,63
Tensão máxima no capacitor C_i	215,53 V	200,45 V	7
Corrente máxima no indutor L_o	20,01 A	19,99 A	0,10
Corrente eficaz no indutor L_o	5,37 A	5,45 A	1,49
Corrente máxima no diodo D	23,86 A	23,80 A	0,25
Corrente eficaz no diodo D	4,02 A	4,05 A	0,75
Tensão máxima no diodo D (em módulo)	465,53 V	450,66 V	3,19
Corrente média na saída	1,20 A	1,20 A	0
Tensão média na saída	250 V	250,21 V	0,08

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após terem sido validados os projetos pela simulação numérica são criados os esquemas elétricos. Na Figura 43, pode ser visualizado o esquema elétrico do retificador Boost e na Figura 44 do retificador SEPIC.

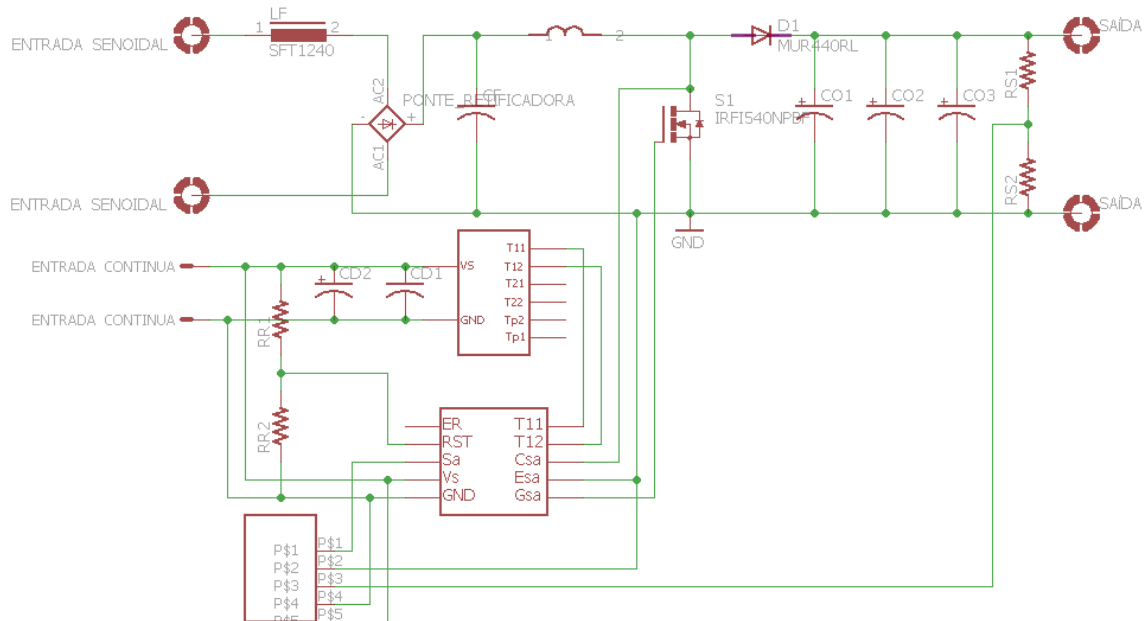


Figura 45 - Esquema elétrico do retificador Boost
Fonte: Autoria própria

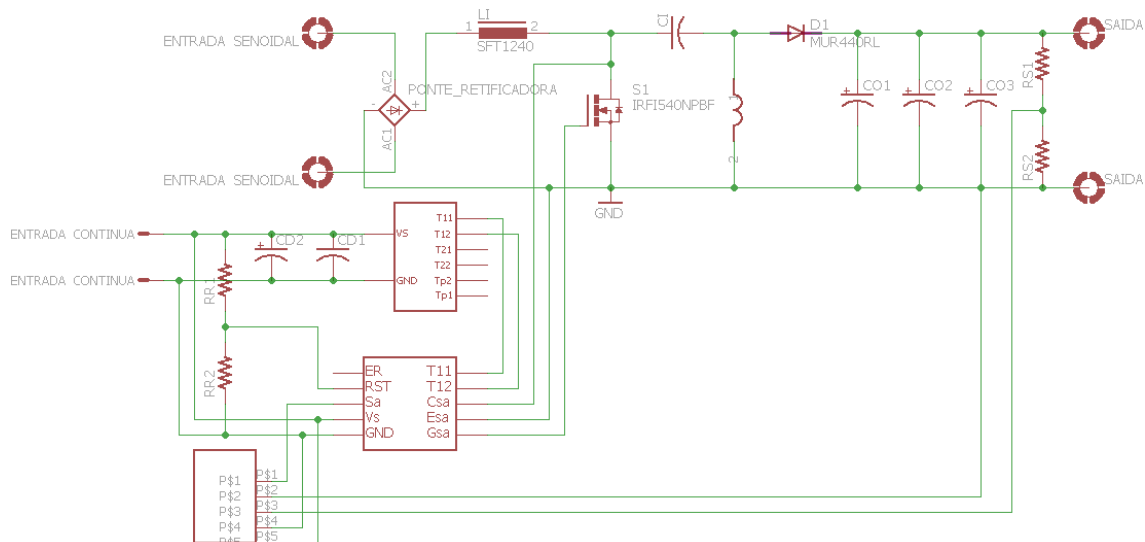


Figura 46 - Esquema elétrico do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A partir dos esquemáticos elétricos foram elaborados os *layouts* dos retificadores, que são apresentados na Figura 45 e na Figura 46.

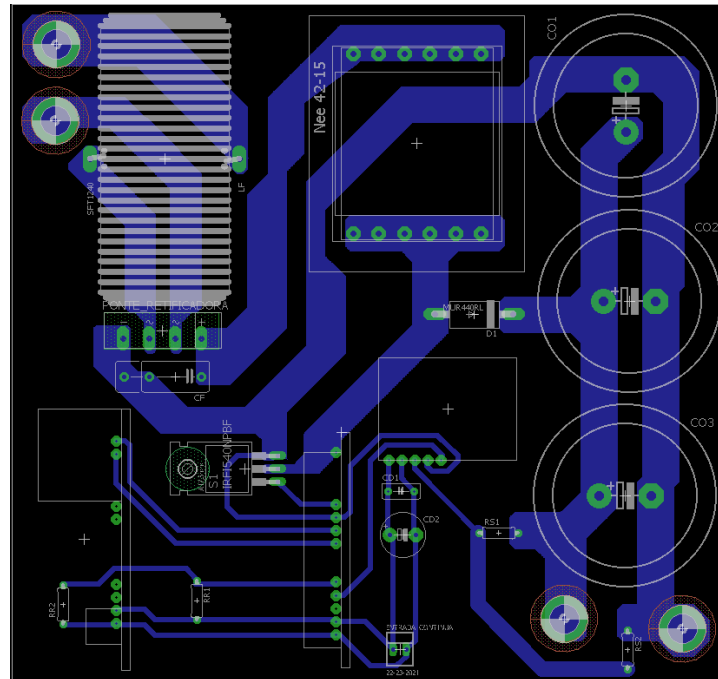


Figura 47 - Layout do retificador Boost
Fonte: Autoria própria

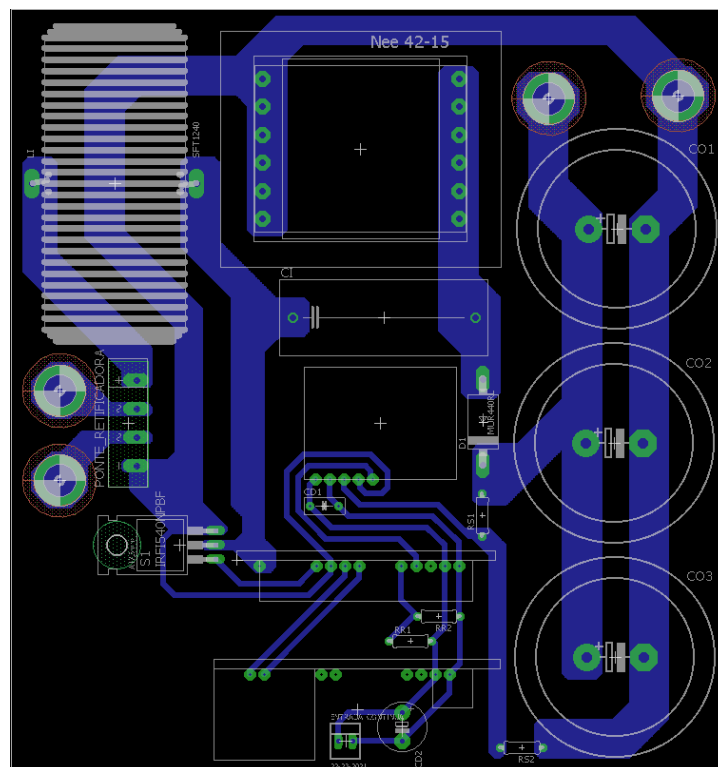


Figura 48 - Layout do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Com o *layout* pronto e os componentes selecionados os retificadores foram construídos. A Figura 47 e a Figura 48 mostram os retificadores que foram utilizados na realização dos testes práticos.

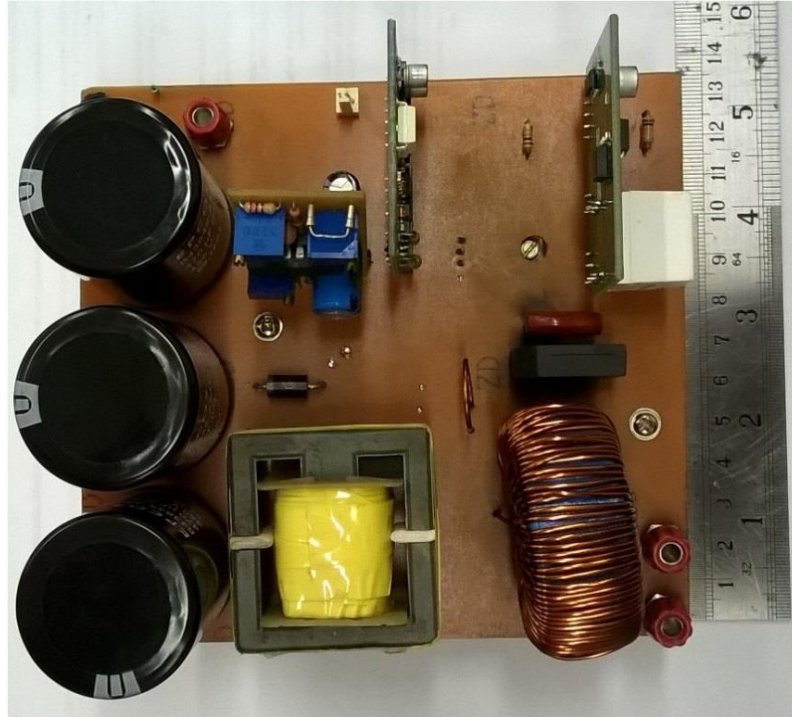


Figura 49 - Retificador Boost MCD
Fonte: Autoria própria

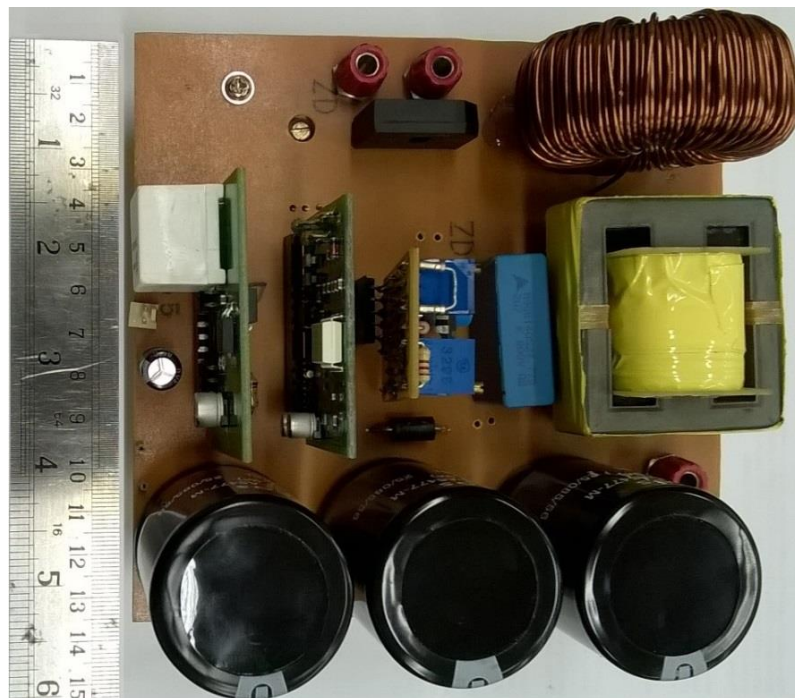


Figura 50 - Retificador SEPIC MCD
Fonte: Autoria própria

5.1 RETIFICADOR BOOST USANDO A PRIMEIRA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTADA

A Figura 51 apresenta as formas de onda da corrente e da tensão na entrada do retificador. É possível verificar que a corrente e a tensão estão em fase, caracterizando um elevado fator de potência. Observa-se também que a corrente não possui o formato puramente senoidal.

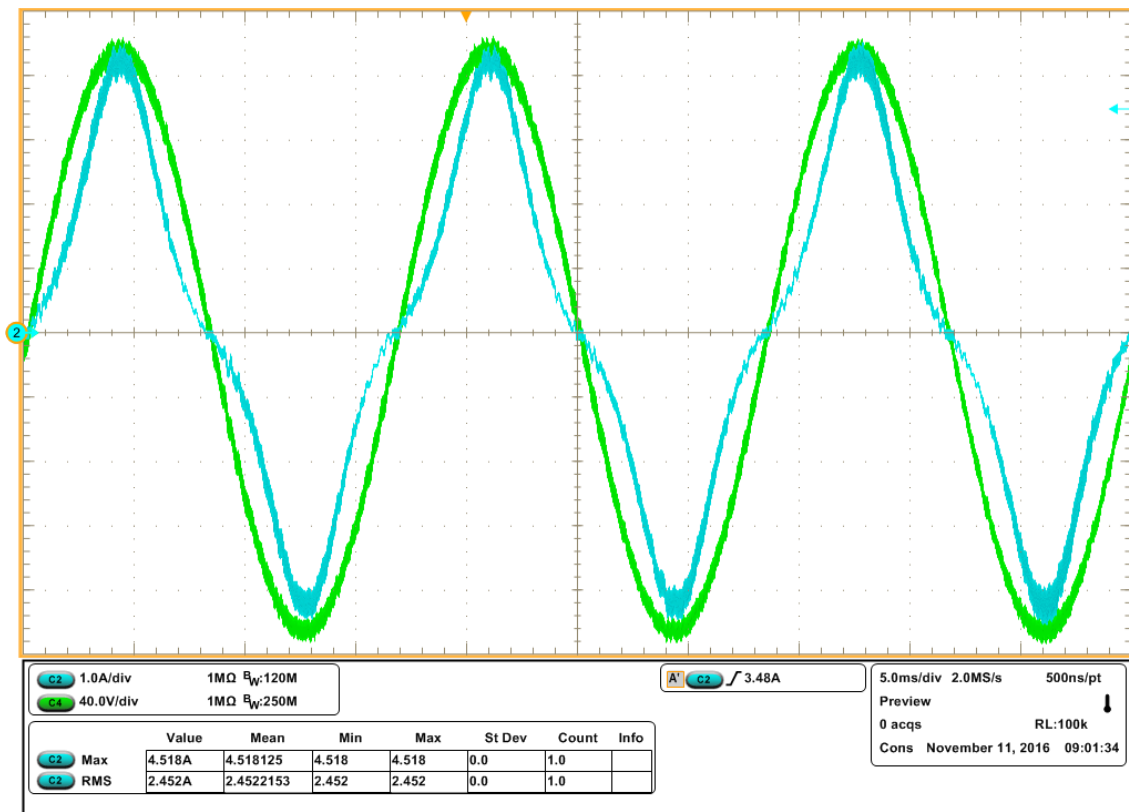


Figura 51 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

O detalhe de ondulação da corrente na entrada com frequência de 20 kHz é demonstrado pela Figura 52. Esta forma de onda foi retirada no pico de corrente, onde possui maior ondulação com o valor de 400 mA.

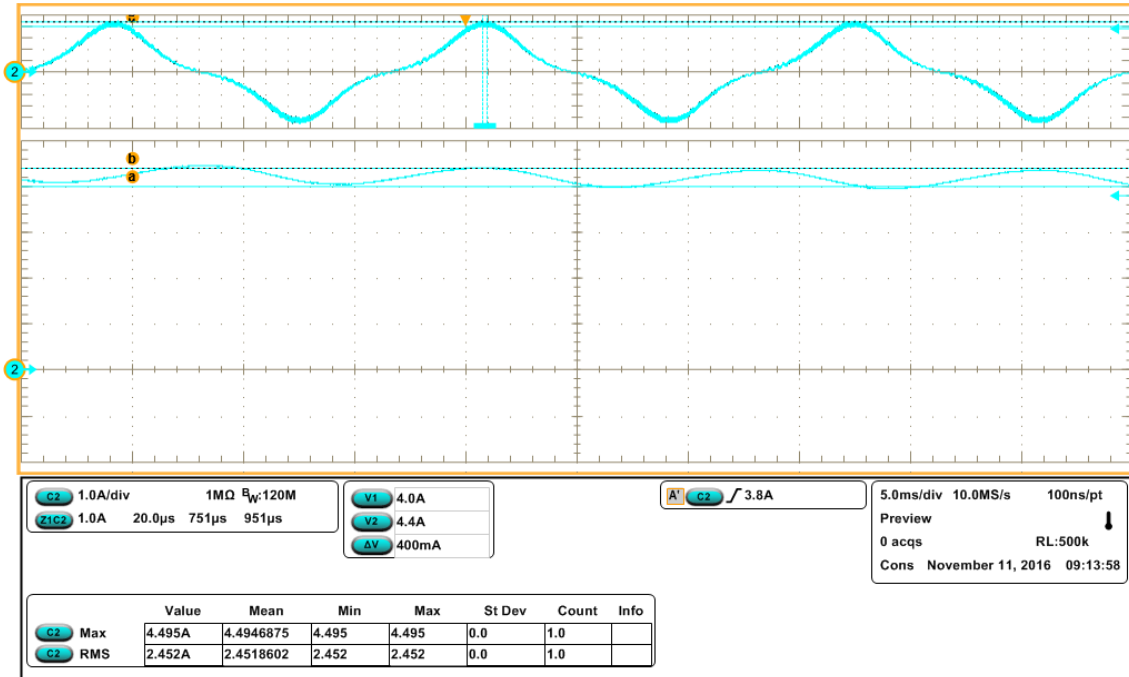


Figura 52 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

Na Figura 53 e na Figura 54, são mostradas as formas de onda da corrente no indutor L_i com seu detalhe de ondulação em alta frequência. Pode-se observar na Figura 53, que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 9,76 A, a Figura 54 confirma a operação do conversor no MCD.

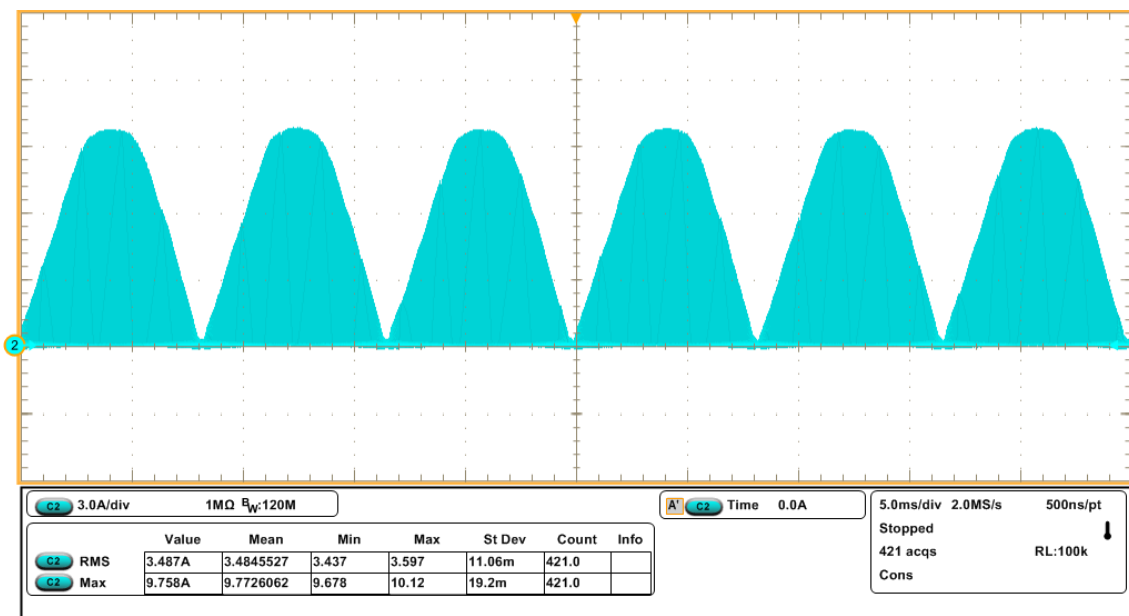


Figura 53 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

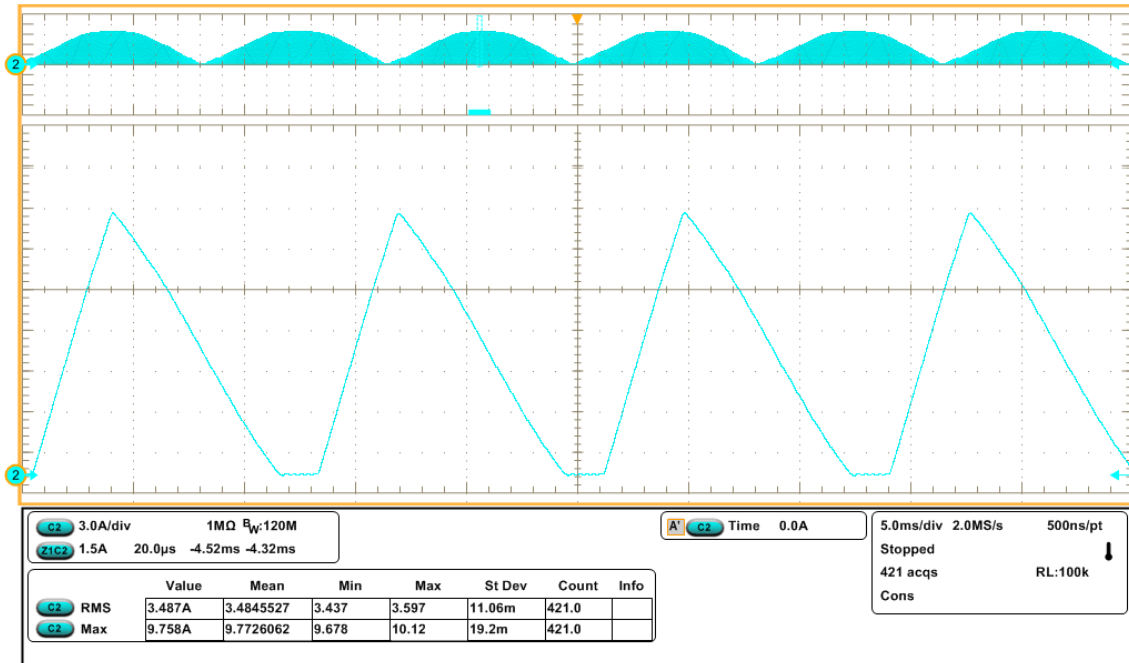


Figura 54 - Ondulação da corrente no indutor L_1 do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 55 e da Figura 56, são exibidas as formas de onda da tensão no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 kHz, verifica-se que o máximo valor da tensão é de 255 V.

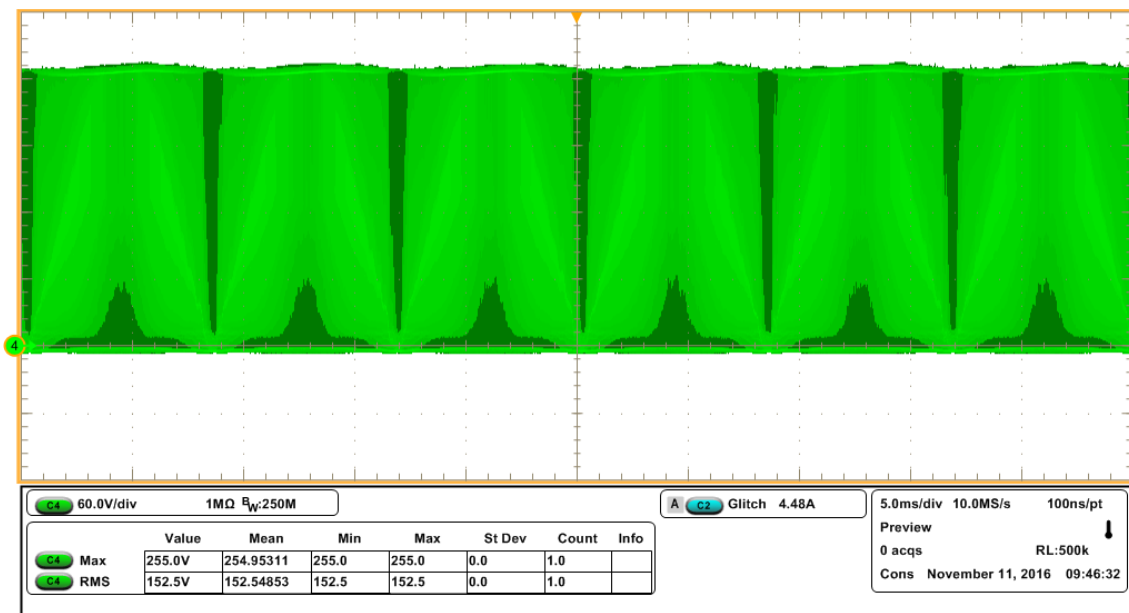


Figura 55 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

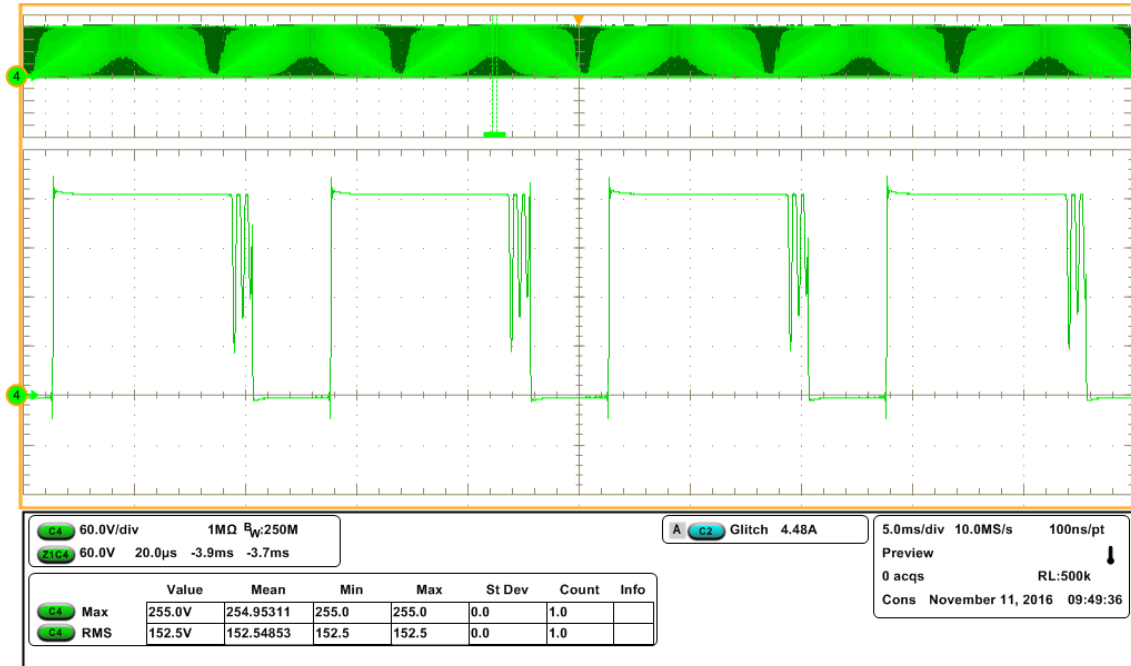


Figura 56 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no interruptor S com seu detalhe de ondulação em alta frequência são expostos por meio da Figura 57 e da Figura 58. Nota-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 9,36 A.

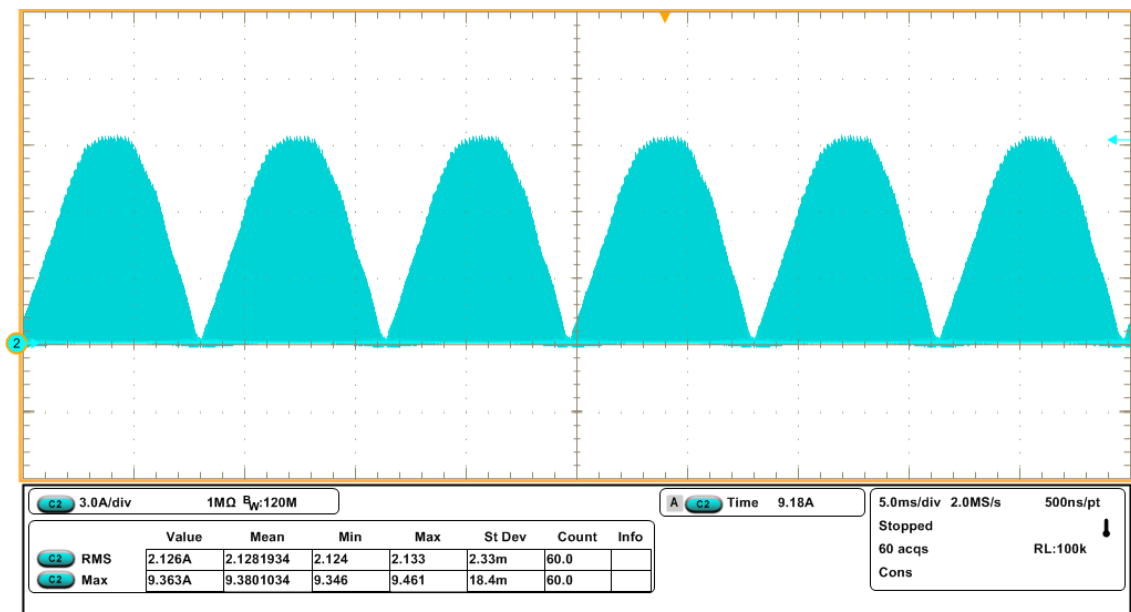


Figura 57 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

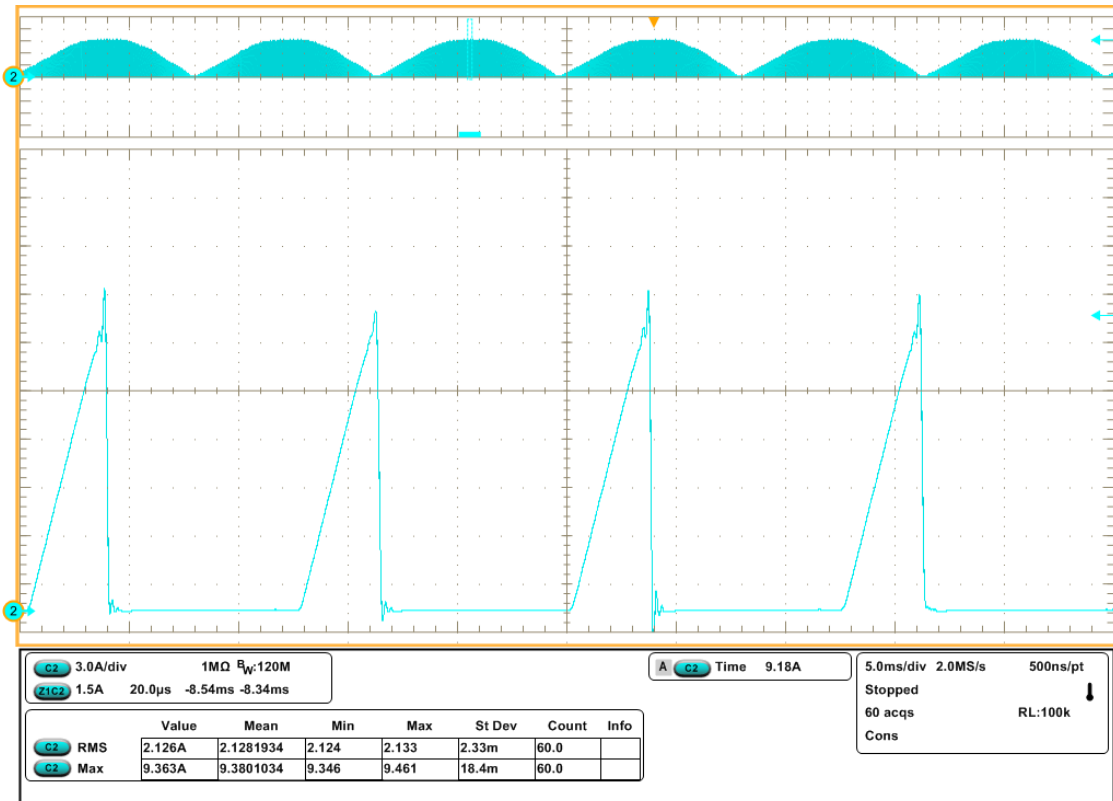


Figura 58 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

Por intermédio da Figura 59 e da Figura 60 são apresentadas as formas de onda da tensão no diodo D, com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Constata-se que o máximo valor medido em módulo é 259,50 V.

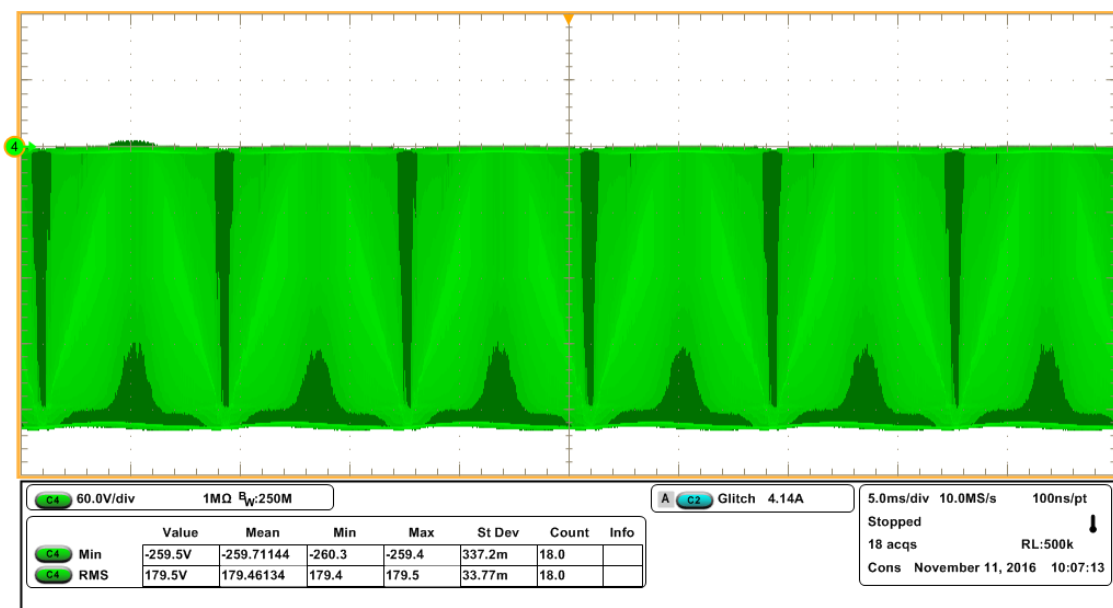


Figura 59 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

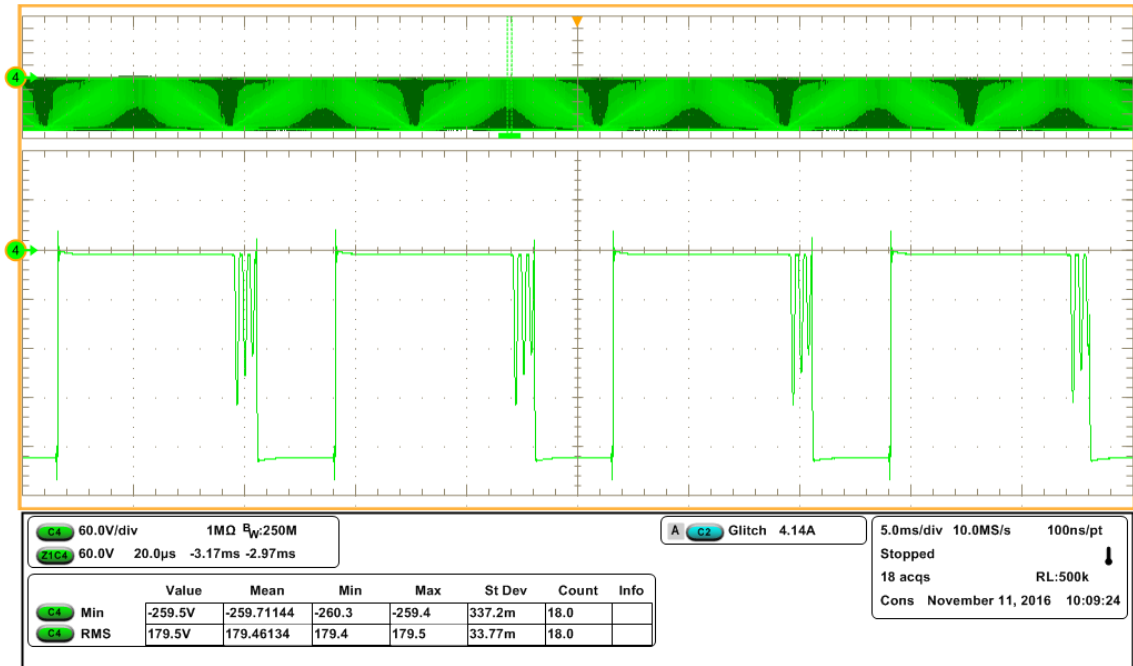


Figura 60 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

Através da Figura 61 e da Figura 62 é retratada a forma de onda da corrente no diodo D, com seu detalhe de ondulação em alta frequência. Verifica-se que a forma de onda possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 9,40 A.

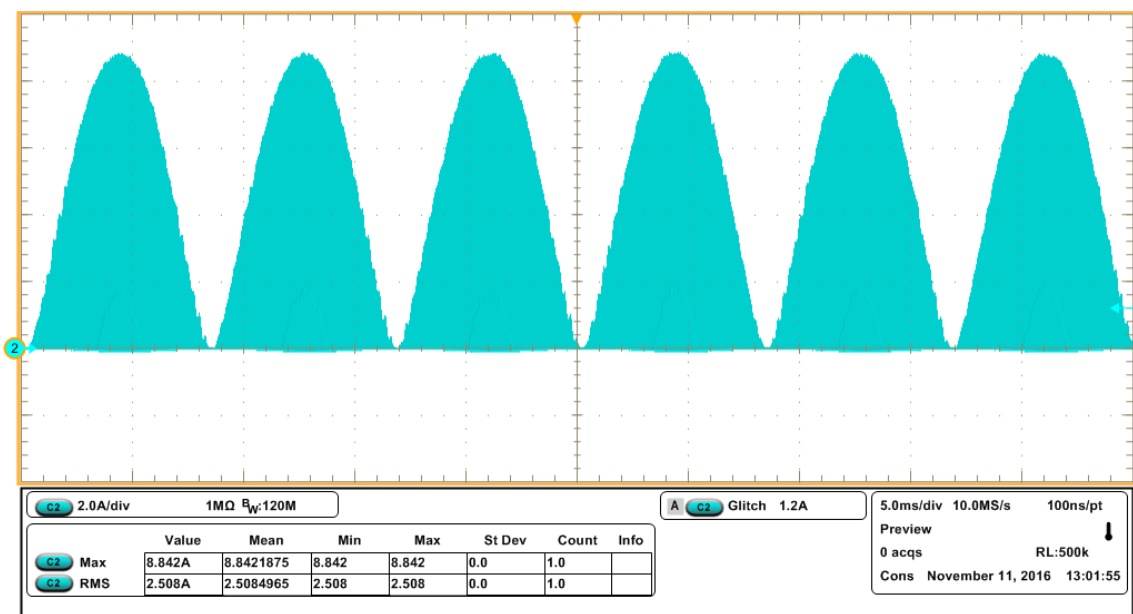


Figura 61 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1
Fonte: Autoria própria

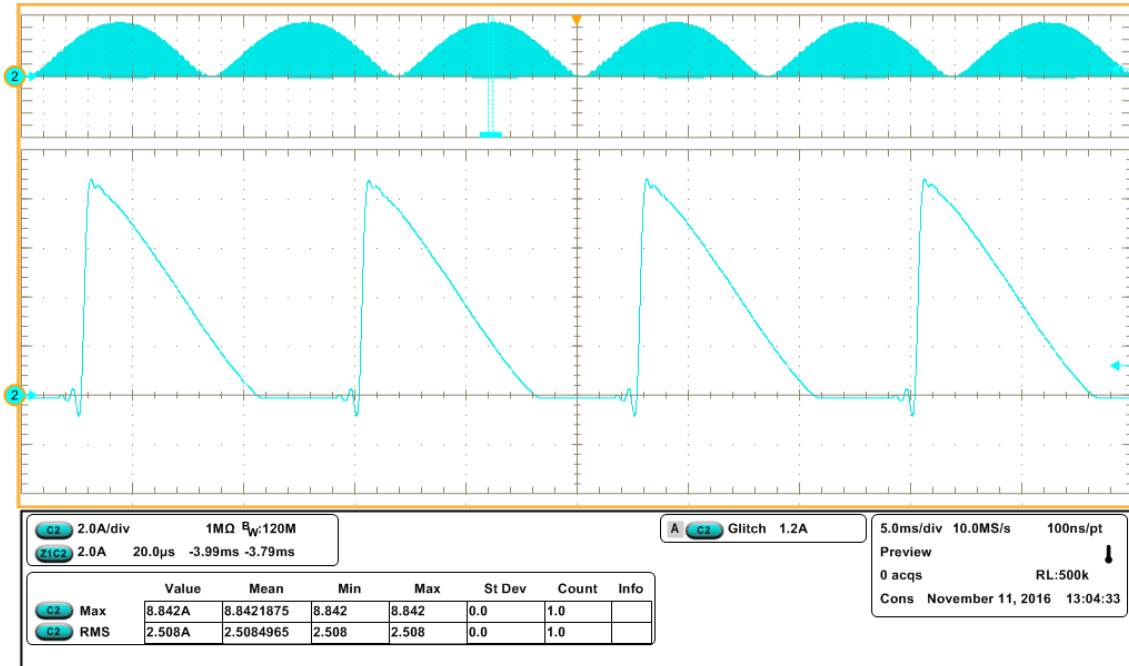


Figura 62 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

Por fim, é indicado na Figura 63 o resultado obtido na saída do conversor, isto é, corrente e tensão oferecidos à carga. O valor médio da tensão na saída é 250,70 V, enquanto que o valor médio da corrente na saída é 1,18 A, assim, tem-se uma potência processada de 295,83 W.

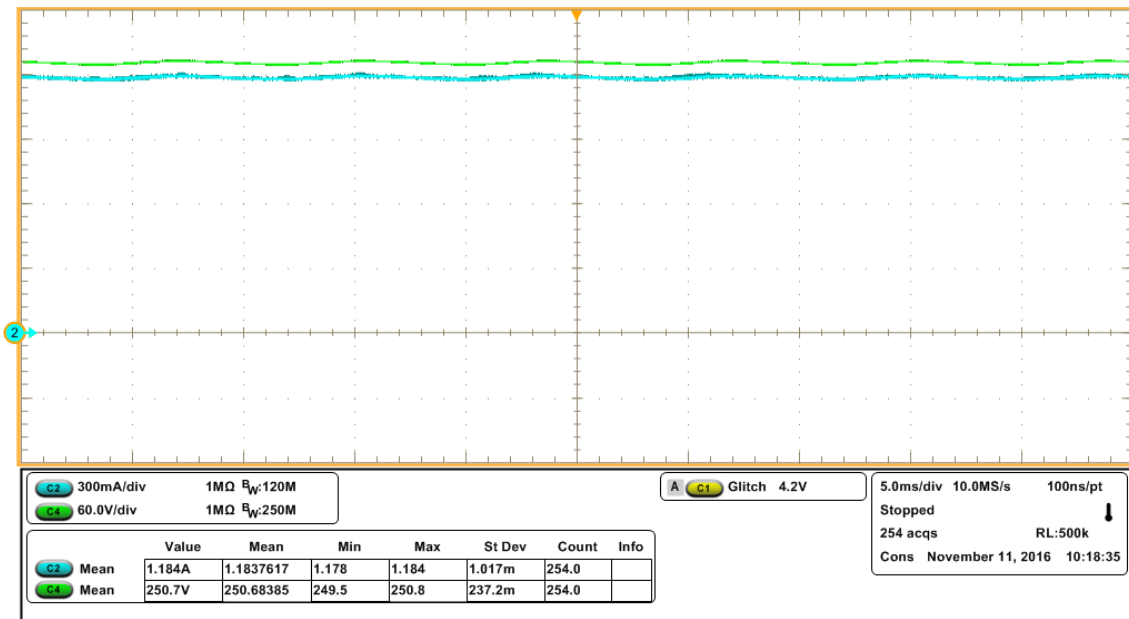


Figura 63 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 1
 Fonte: Autoria própria

São demonstrados na Tabela 10, os valores eficazes e máximos das grandezas mensuradas durante os testes realizados em laboratório. Percebe-se que existe uma pequena diferença entre os valores experimentais com os valores teóricos, não oferecendo nenhum risco de degradação aos elementos da estrutura. A maior diferença de valores ocorre na medição da corrente eficaz no interruptor S com 14,52 % de erro, já na saída do retificador, os valores experimentais e teóricos são muito semelhantes.

Tabela 10 - Valores das grandezas obtidos em laboratório do retificador Boost Filtro 1

Grandeza	Valor teórico	Valor experimental	Erro (%)
Corrente eficaz em L_i	3,19 A	3,49 A	9,40
Corrente máxima em L_i	8,88 A	9,76 A	9,91
Corrente eficaz em S	1,86 A	2,13 A	14,52
Corrente máxima em S	8,88 A	9,36 A	5,41
Corrente eficaz em D	2,57 A	2,51 A	2,33
Corrente máxima em D	8,88 A	8,84 A	0,45
Tensão média na saída	250 V	250,70 V	0,28
Corrente média na saída	1,20 A	1,18 A	1,67

Fonte: Autoria própria

5.2 RETIFICADOR BOOST USANDO A SEGUNDA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO NA ENTRADA

A forma de onda da corrente e tensão na entrada do retificador estão indicadas na Figura 62. É possível verificar que a corrente e tensão estão em fase, evidenciando um elevado fator de potência. Também é possível observar que a corrente não possui o formato de uma senoide ideal.

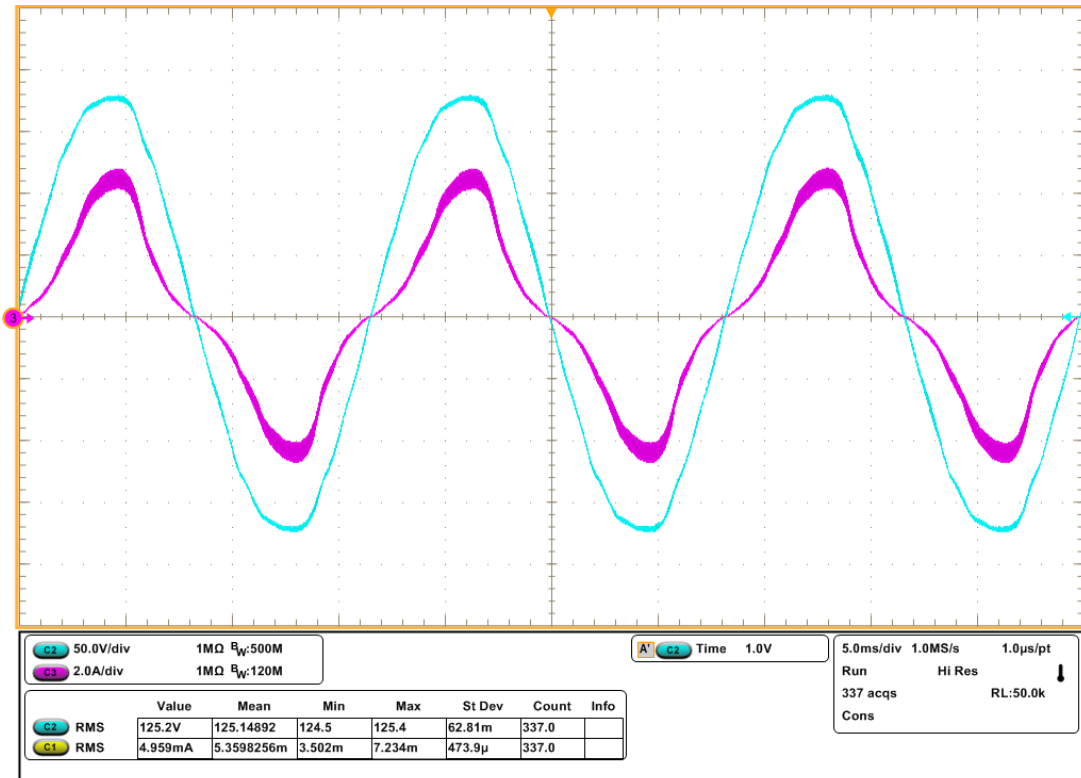


Figura 64 - Corrente e tensão na entrada do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

A Figura 65 exibe o detalhe de ondulação da corrente na entrada com frequência de 20 kHz. Esta forma de onda foi extraída do pico de corrente, onde possui maior ondulação com o valor de 800 mA.

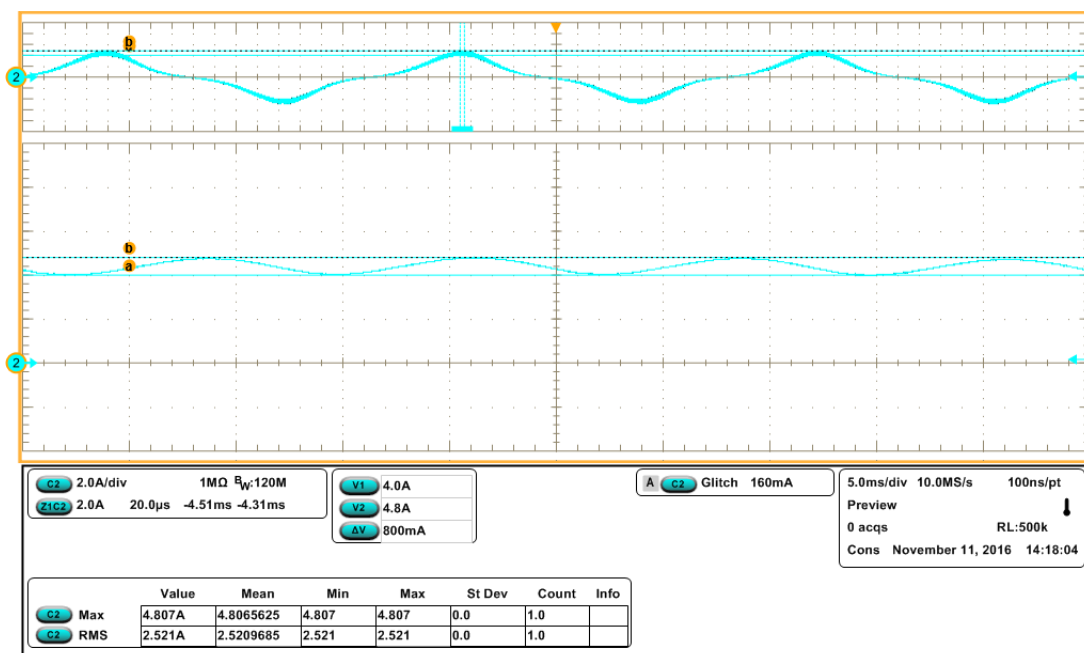


Figura 65 - Ondulação da corrente na entrada do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no indutor L_i com seu detalhe de ondulação em alta frequência são expostos pela Figura 64 e pela Figura 65. É possível observar na Figura 64, que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 10,73 A. A Figura 65 comprova a operação do conversor no MCD.

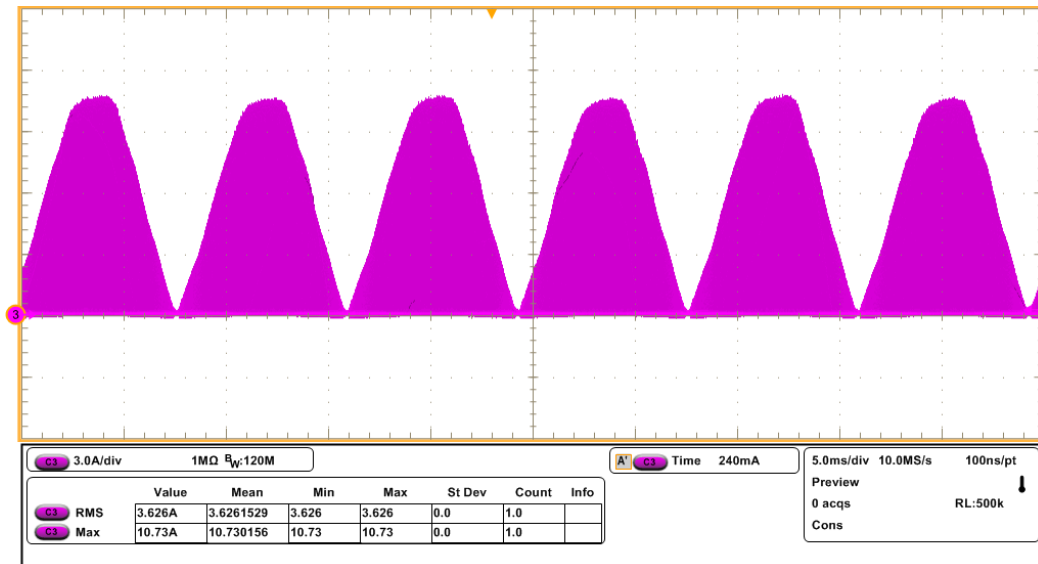


Figura 66 - Corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

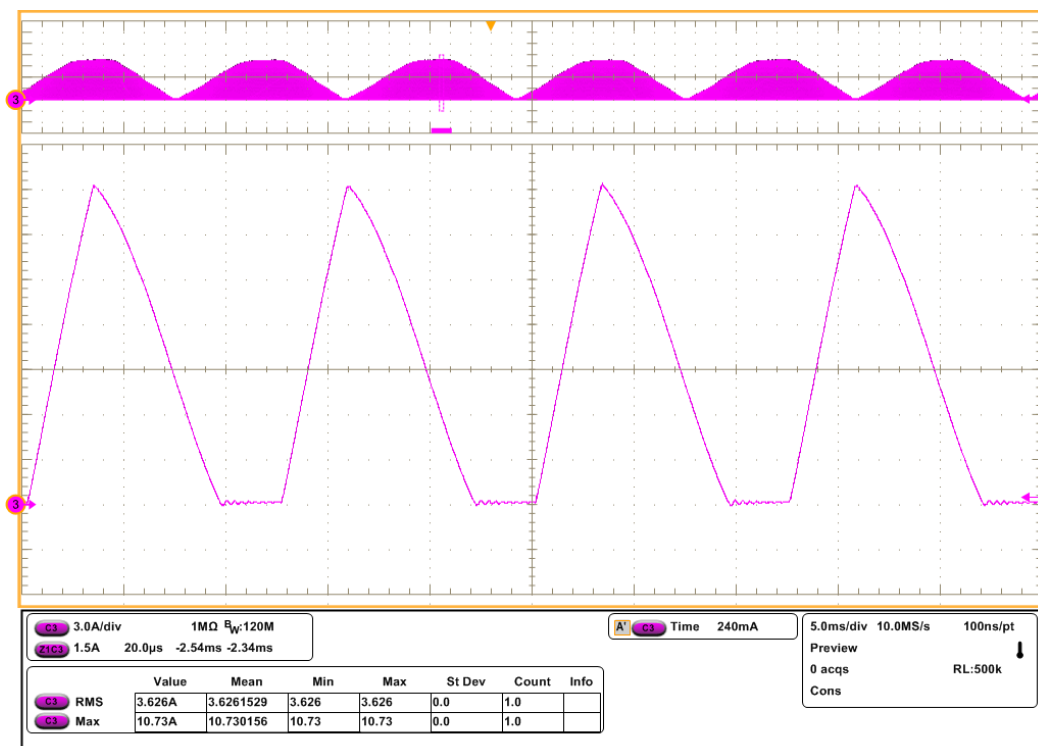


Figura 67 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

Na Figura 68 e na Figura 69 são apresentadas as formas de onda da tensão no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Nota-se que a valor máximo da tensão é 273,5 V.

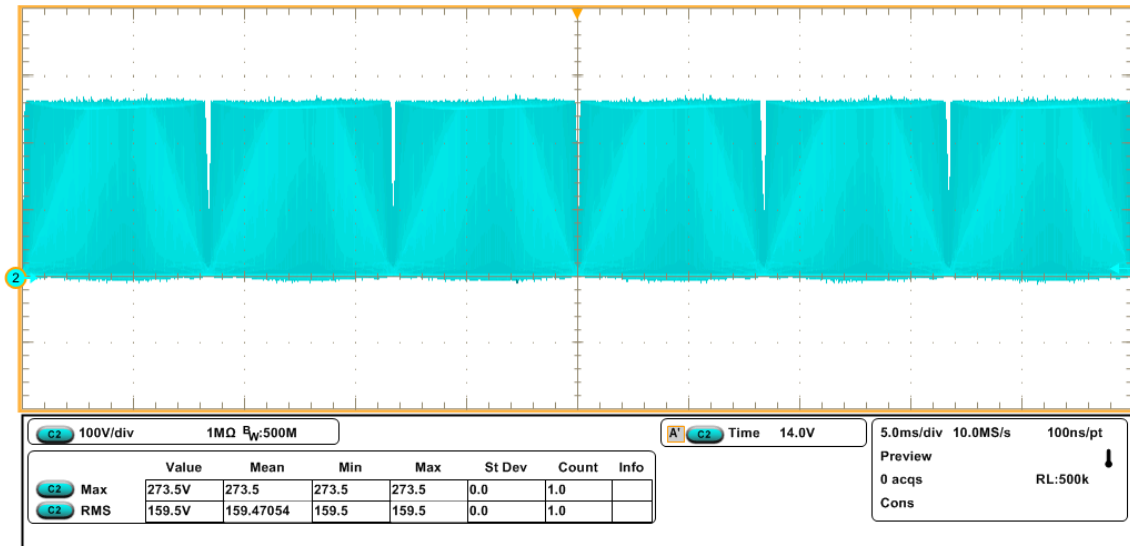


Figura 68 - Tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

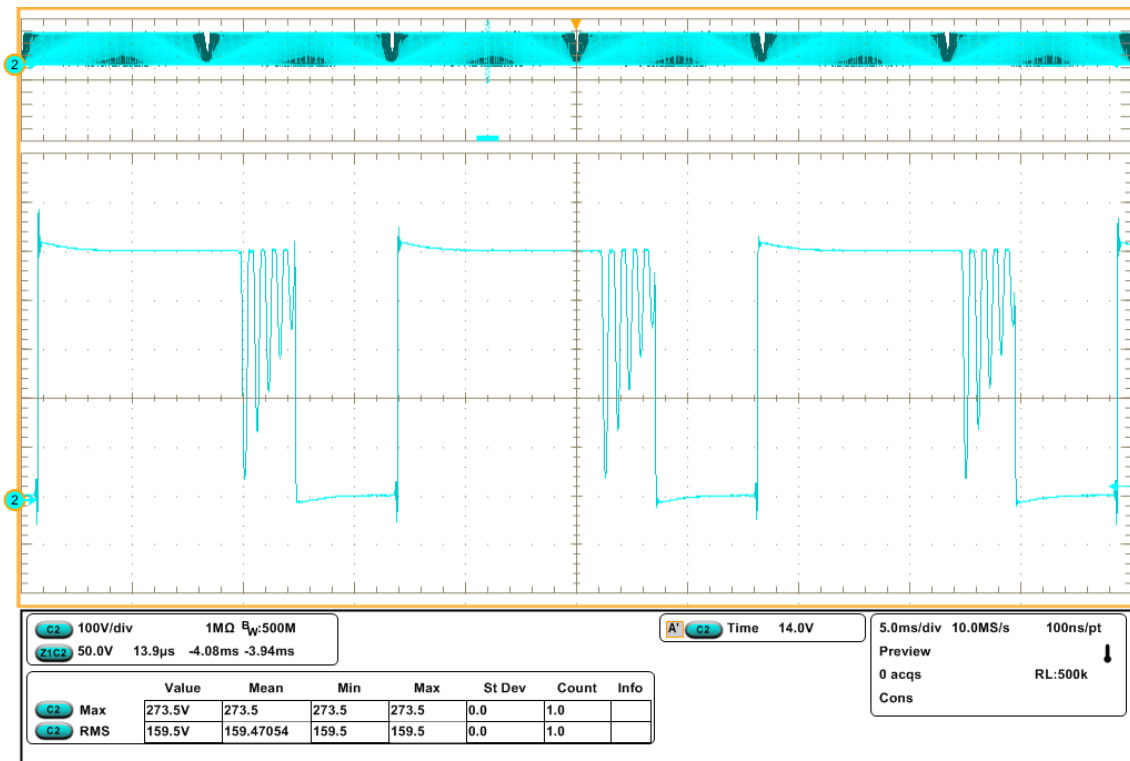


Figura 69 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no interruptor S com seu detalhe de ondulação em alta frequência são apresentados através da Figura 70 e da Figura 71. Verifica-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 11,11 A.

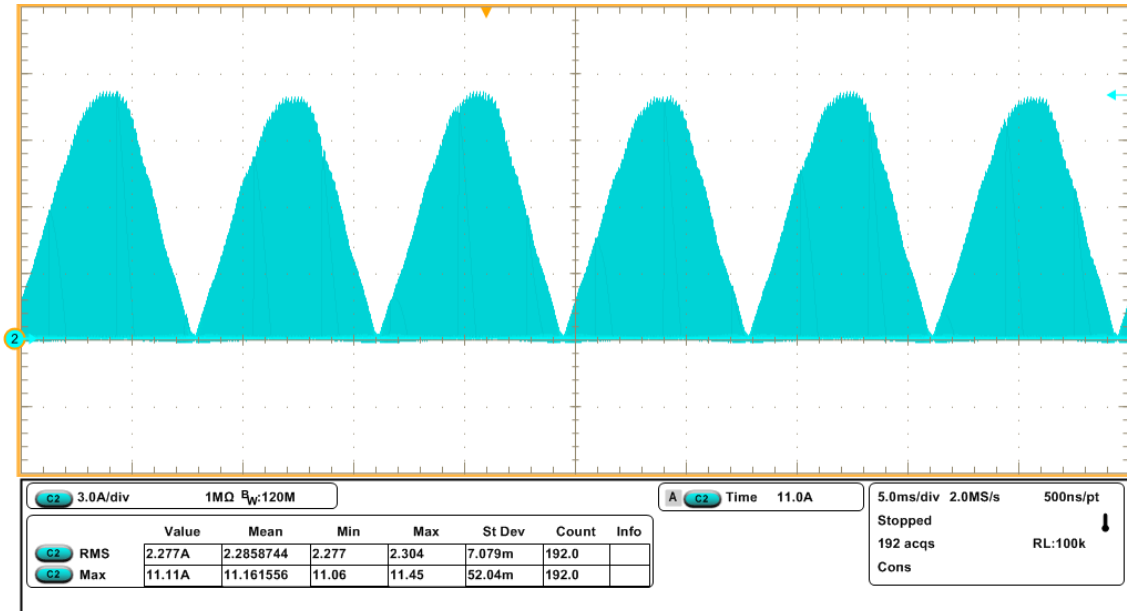


Figura 70 - Corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

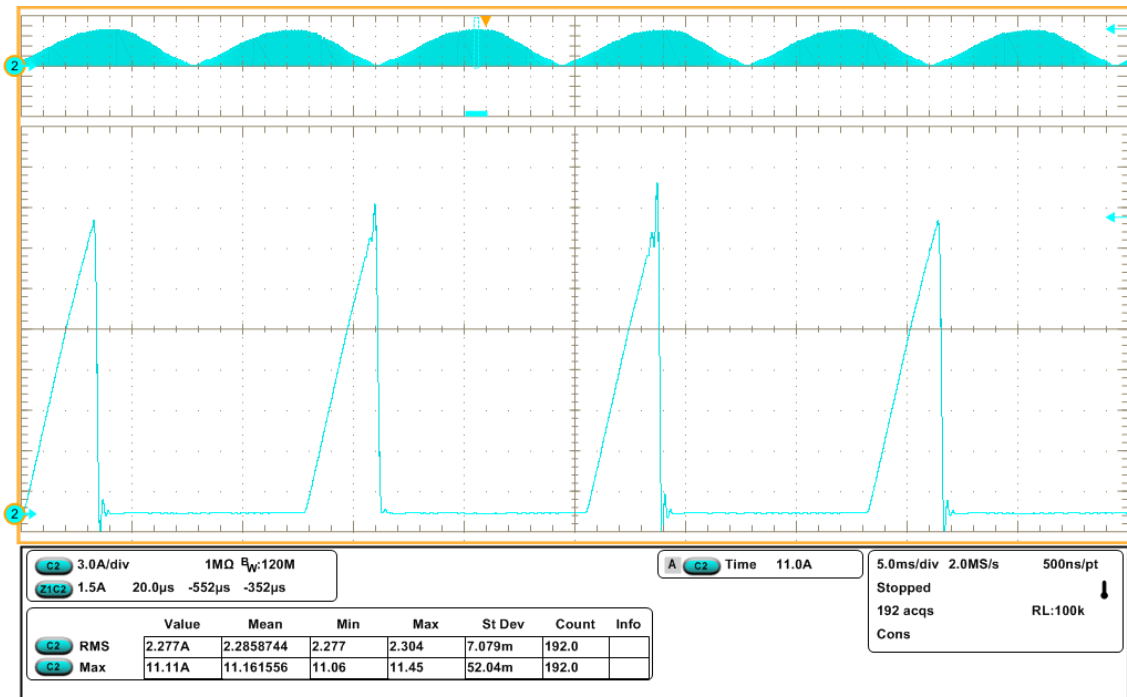


Figura 71 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

A Figura 70 e a Figura 71 apontam a forma de onda da tensão no diodo D, com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Observa-se que o máximo valor em módulo da tensão é 257,60 V.

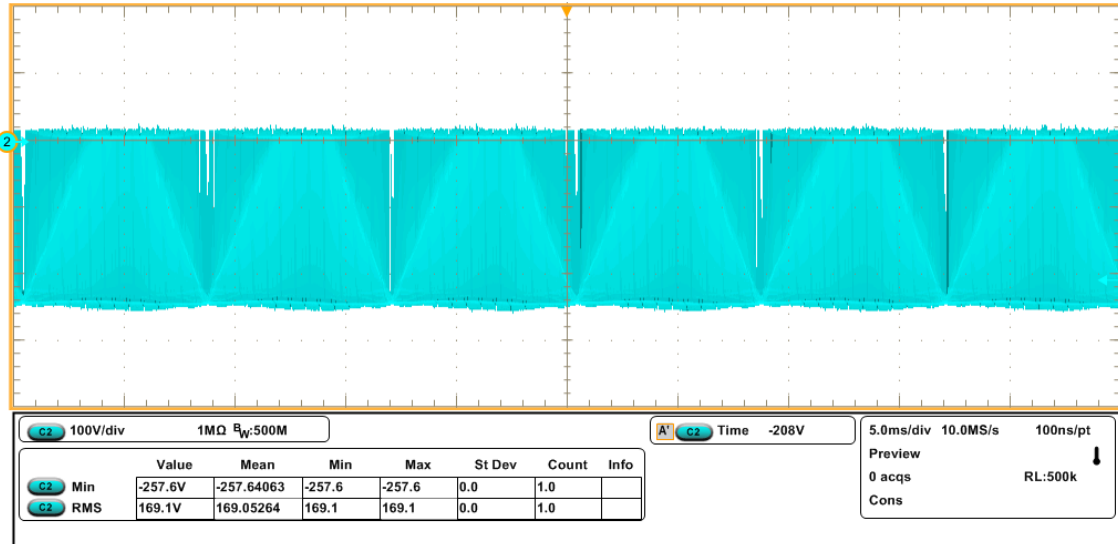


Figura 72 - Tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 2
 Fonte: Autoria própria

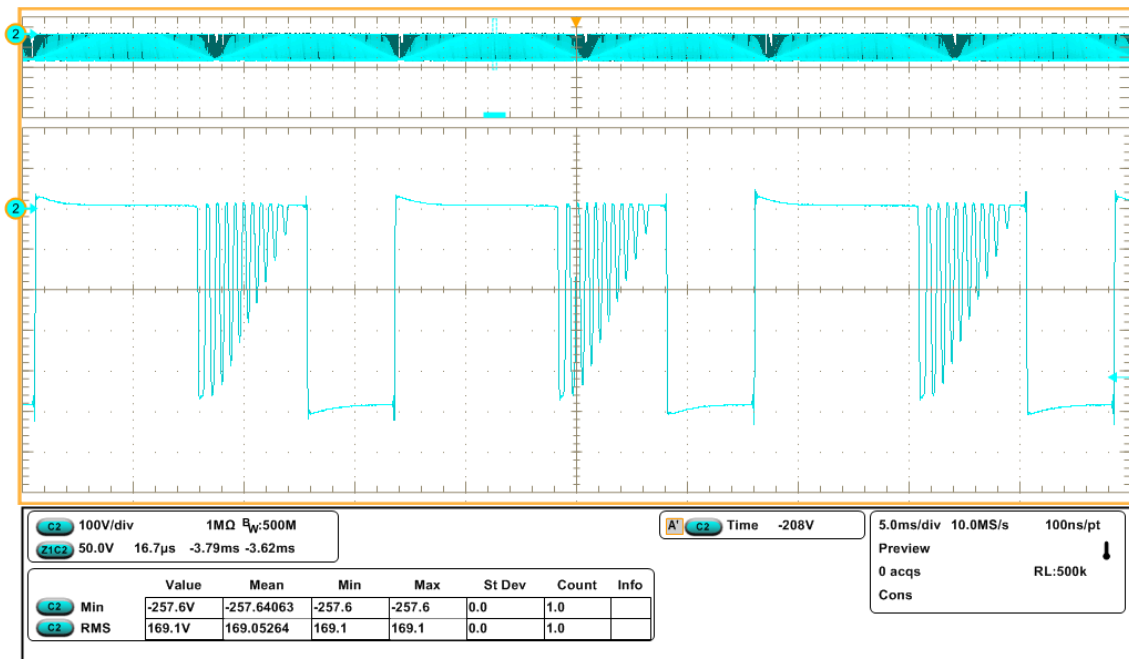


Figura 73 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador Boost Filtro 2
 Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no diodo D, com seu detalhe de ondulação em alta frequência, estão indicados por meio da Figura 74 e da Figura 75. Nota-se que a forma de onda da corrente possui uma envoltória senoidal com ondulação em 20 kHz e valor máximo de 10,42 A.

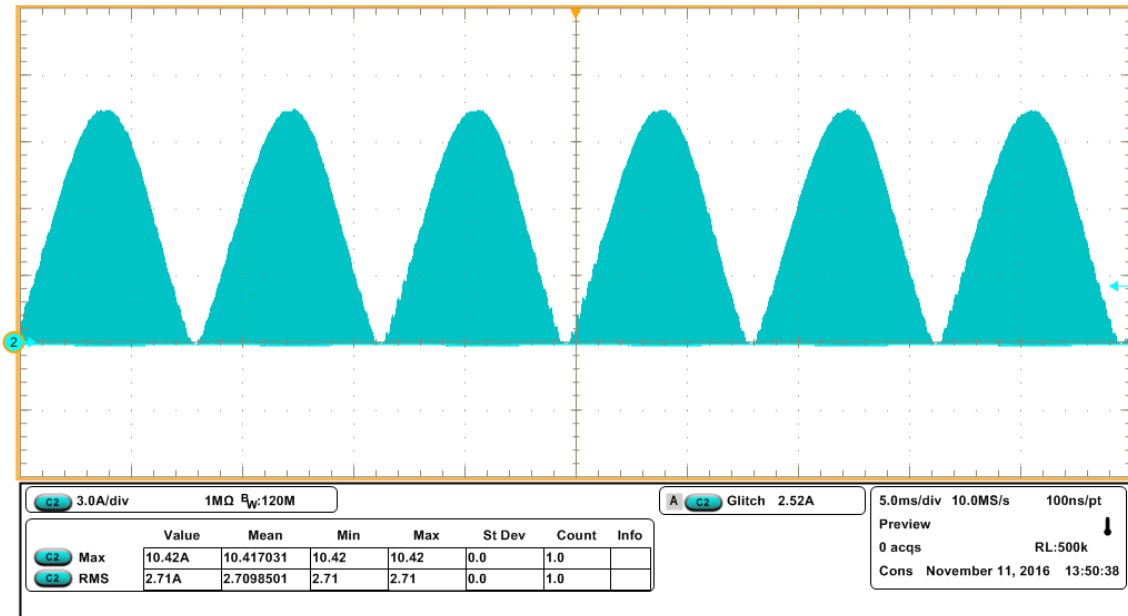


Figura 74 - Corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

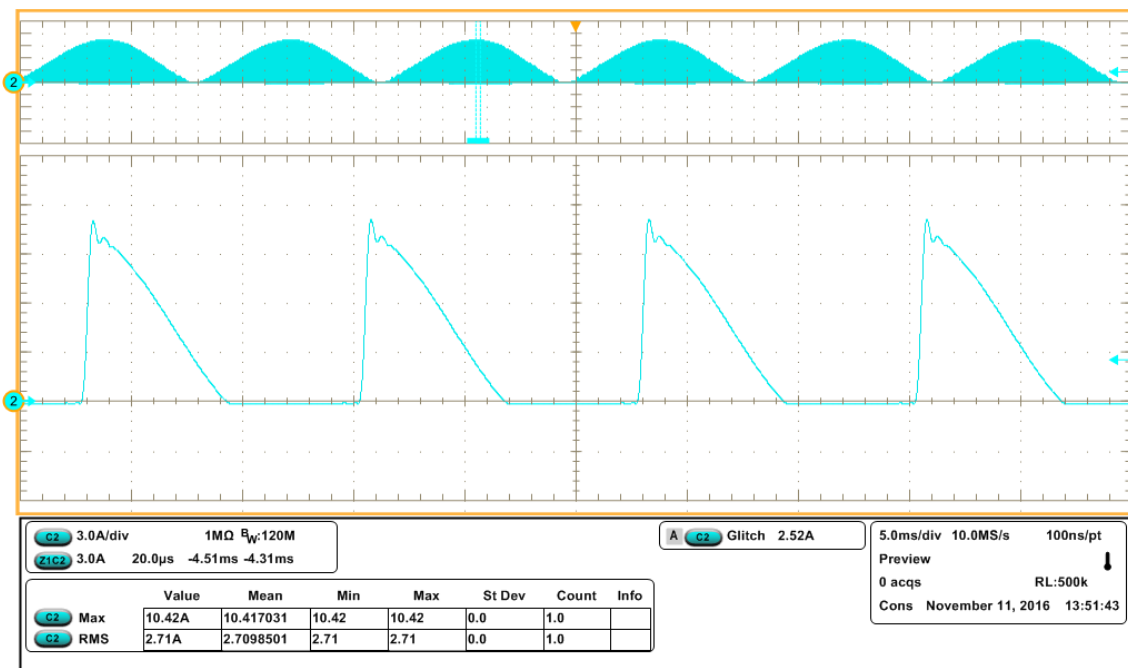


Figura 75 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

Finalmente, é indicado na Figura 76 o resultado atingido na saída do retificador, ou seja, corrente e tensão disponibilizados à carga. O valor médio da tensão na saída é 250,40 V e o valor médio da corrente na saída é 1,19 A, desta forma, tem-se uma potência processada de 297,98 W.

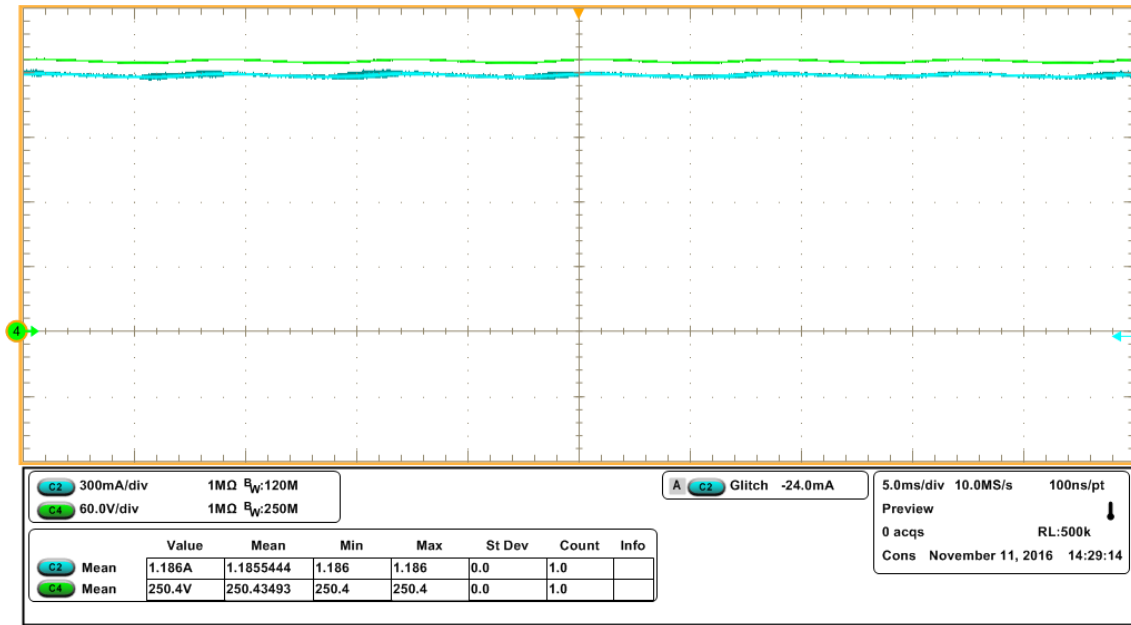


Figura 76 - Corrente e tensão na saída do retificador Boost Filtro 2
Fonte: Autoria própria

A Tabela 11 traz os valores eficazes e máximos das grandezas mensuradas durante os testes realizados em laboratório. Da mesma forma que ocorreu com os valores obtidos por meio da simulação numérica, quando comparado as duas metodologias de projeto do filtro na entrada do retificador Boost, os dados obtidos experimentalmente na segunda metodologia também apresentaram maior desigualdade com os valores teóricos das grandezas. Apesar da diferença que existe entre os valores experimentais com os teóricos não existe nenhum risco de degradação aos elementos da estrutura. A maior diferença de valores das grandezas ocorre na medição da corrente máxima no interruptor com 25,11 % de erro, já na saída do retificador, os valores experimentais e teóricos são muito semelhantes.

Tabela 11 - Valores das grandezas adquiridos em laboratório do retificador Boost Filtro 2

Grandeza	Valor teórico	Valor experimental	Erro (%)
Corrente máxima em L_i	8,88 A	10,73 A	20,83
Corrente eficaz em L_i	3,19 A	3,63 A	13,79
Tensão máxima em S	251,25 V	273,50 V	8,86
Corrente máxima em S	8,88 A	11,11 A	25,11
Corrente eficaz em S	1,86 A	2,28 A	22,58
Tensão máxima em D (em módulo)	251,25 V	257,60 V	2,53
Corrente máxima em D	8,88 A	10,42 A	17,34
Corrente eficaz em D	2,57 A	2.71 A	5,45
Corrente média na saída	1,20 A	1,19 A	0,83
Tensão média na saída	250 V	250,40 V	0,16

Fonte: Autoria própria

5.3 RETIFICADOR SEPIC

A forma de onda da corrente e da tensão na entrada do retificador é exibida na Figura 77. É possível observar que a corrente possui o formato senoidal e está em fase com a tensão, indicando um elevado fator de potência.

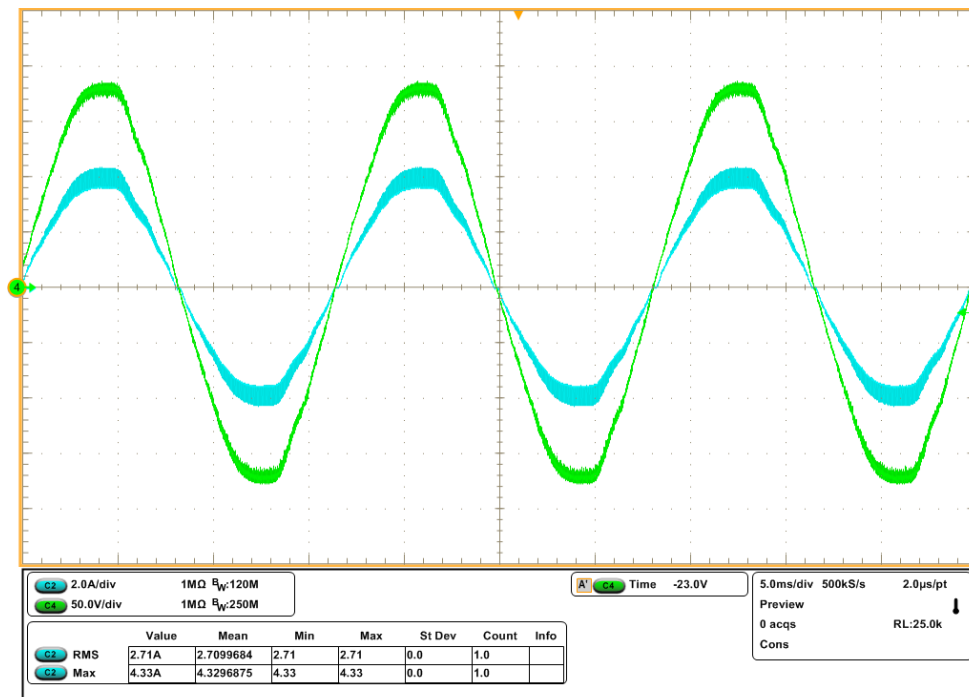


Figura 77 - Corrente e tensão na entrada do retificador SEPIC

Fonte: Autoria própria

A Figura 78 expõe o detalhe de ondulação da corrente na entrada com frequência de 20 kHz. Esta forma de onda foi retirada do pico de corrente, onde possui maior ondulação. Nota-se que a corrente possui um pequeno sobressinal devido a comutação em alta frequência, o valor desta ondulação é de 840 mA não levando em consideração o sobressinal.

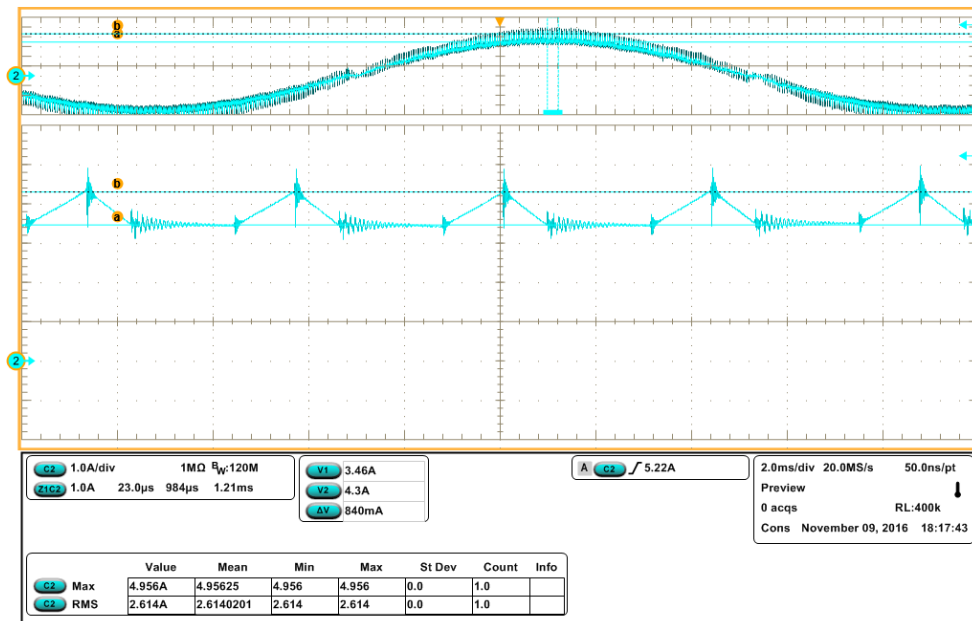


Figura 78 - Ondulação da corrente na entrada do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 79 e da Figura 80, é apontada a forma de onda da corrente no indutor L_i com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Observa-se que a corrente possui uma forma de onda senoidal com máximo valor de 4,21 A.

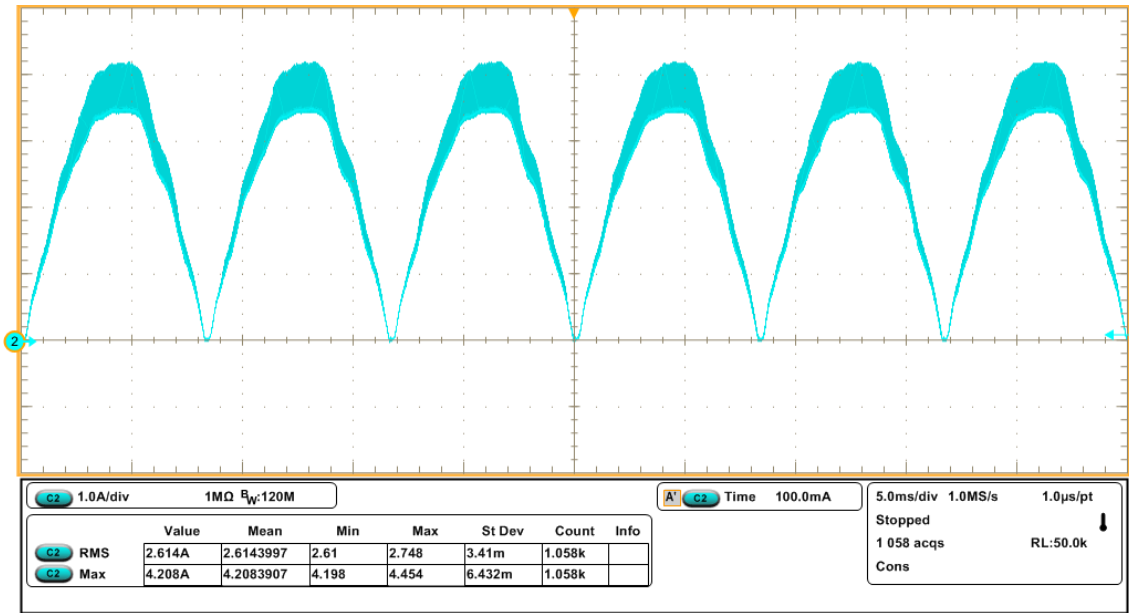


Figura 79 - Corrente no indutor L_i do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

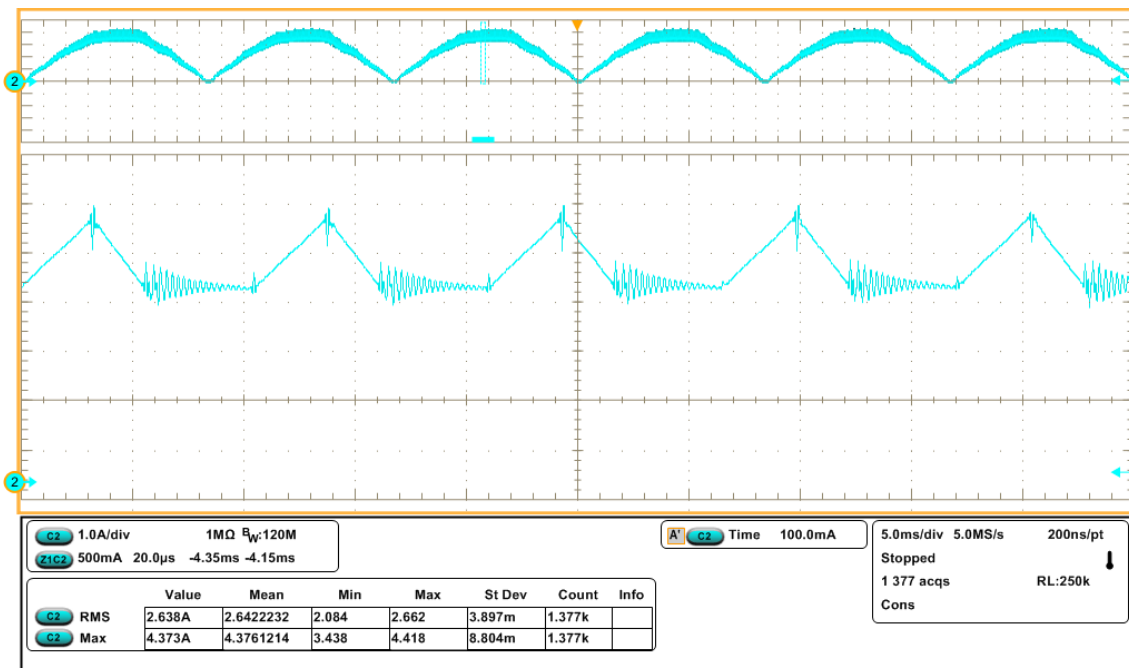


Figura 80 - Ondulação da corrente no indutor L_i do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

A forma de onda da tensão no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 kHz são indicados na Figura 81 e na Figura 82. Percebe-se que o valor máximo da tensão é 421,30 V.

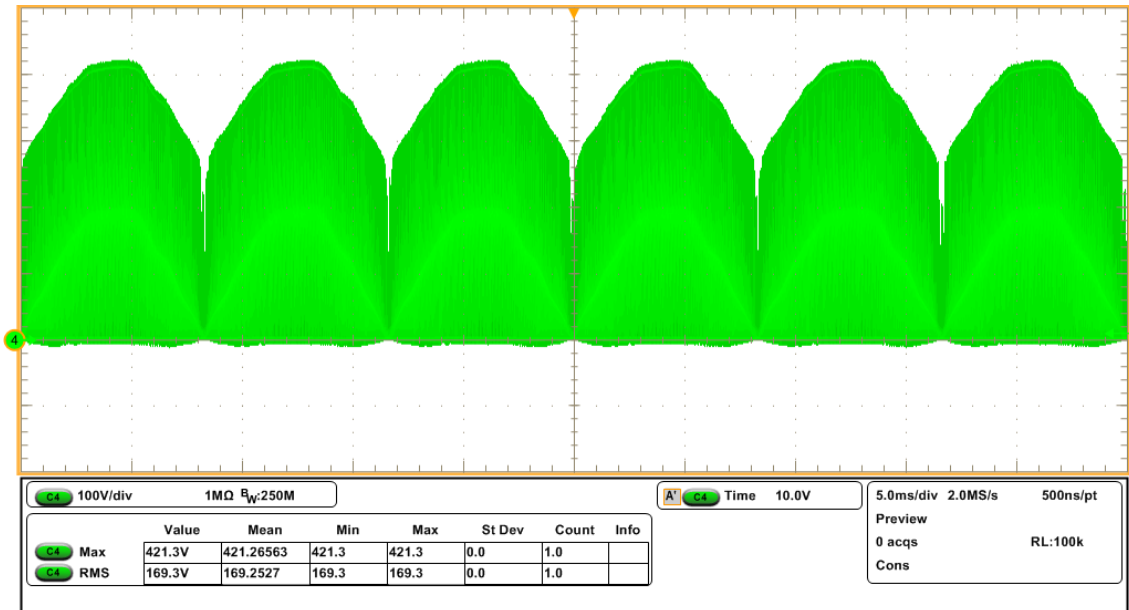


Figura 81 - Tensão no interruptor S do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

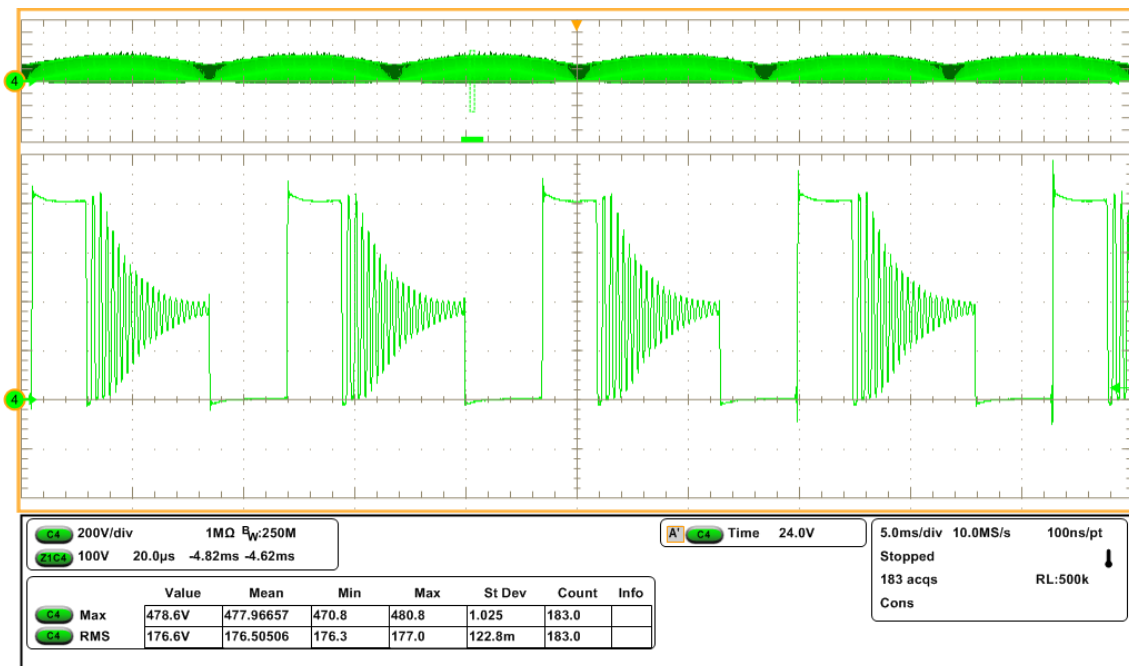


Figura 82 - Ondulação da tensão no interruptor S do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

A Figura 83 e a Figura 84 trazem a forma de onda da corrente no interruptor S com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Nota-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em alta frequência e valor máximo de 24,68 A.

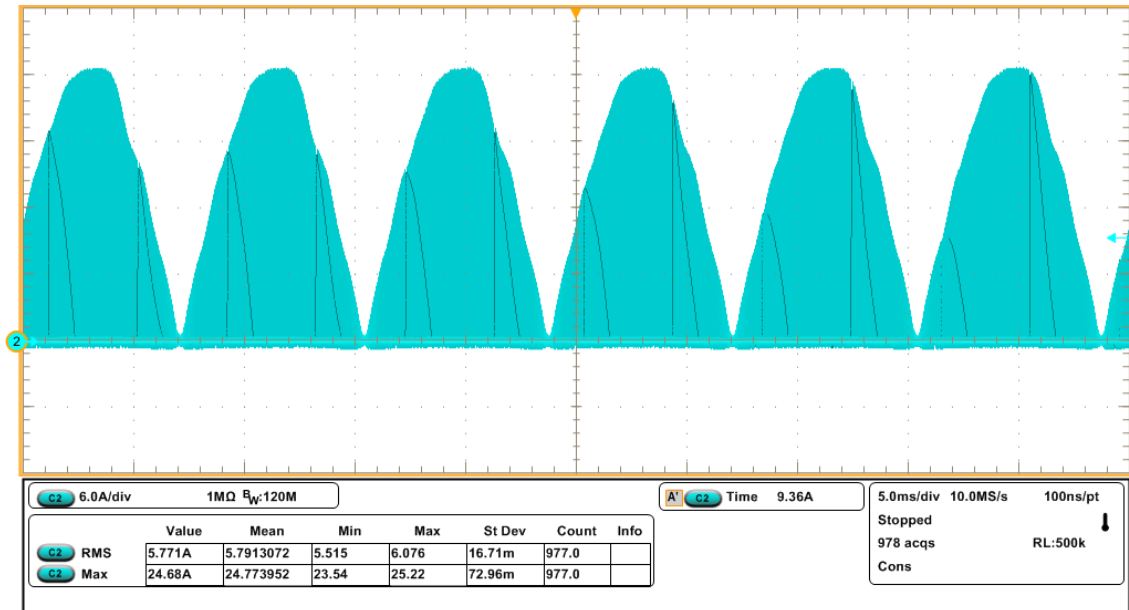


Figura 83 - Corrente no interruptor S do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

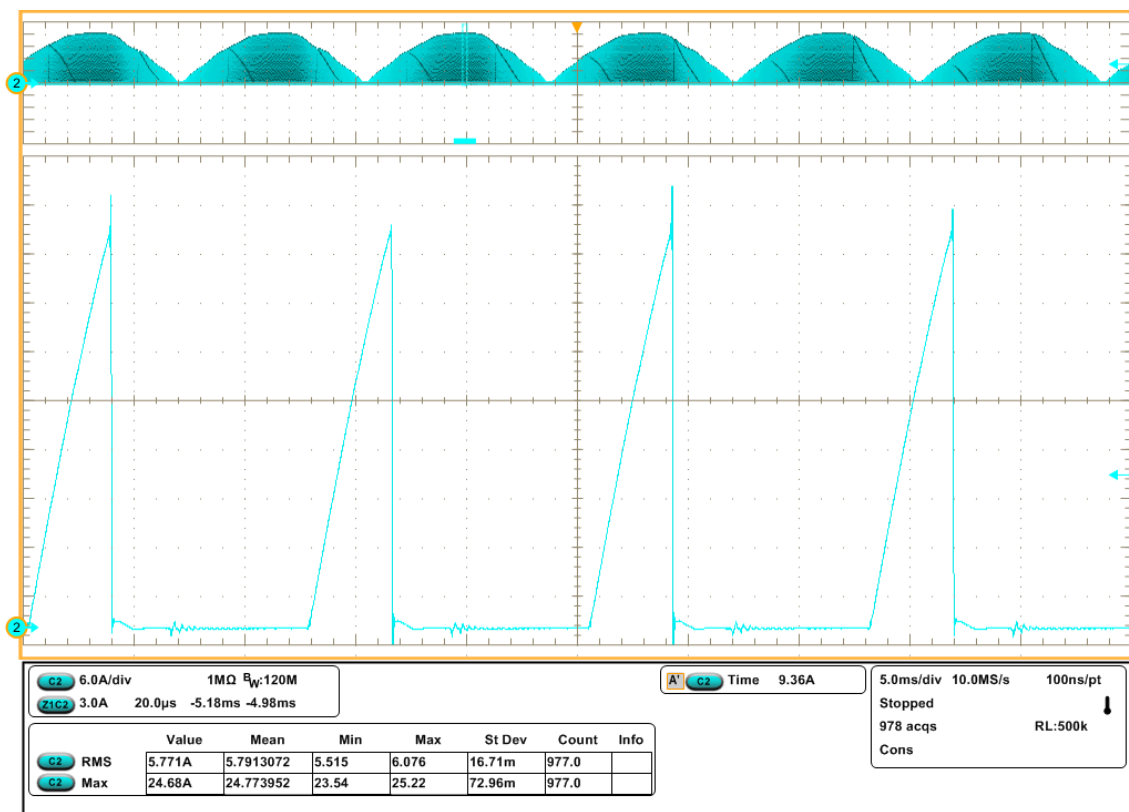


Figura 84 - Ondulação da corrente no interruptor S do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 85 e da Figura 86, é demonstrada a forma de onda da tensão no capacitor C_i com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Observa-se que a forma de onda da tensão possui o formato senoidal com valor máximo de 196,50 V.

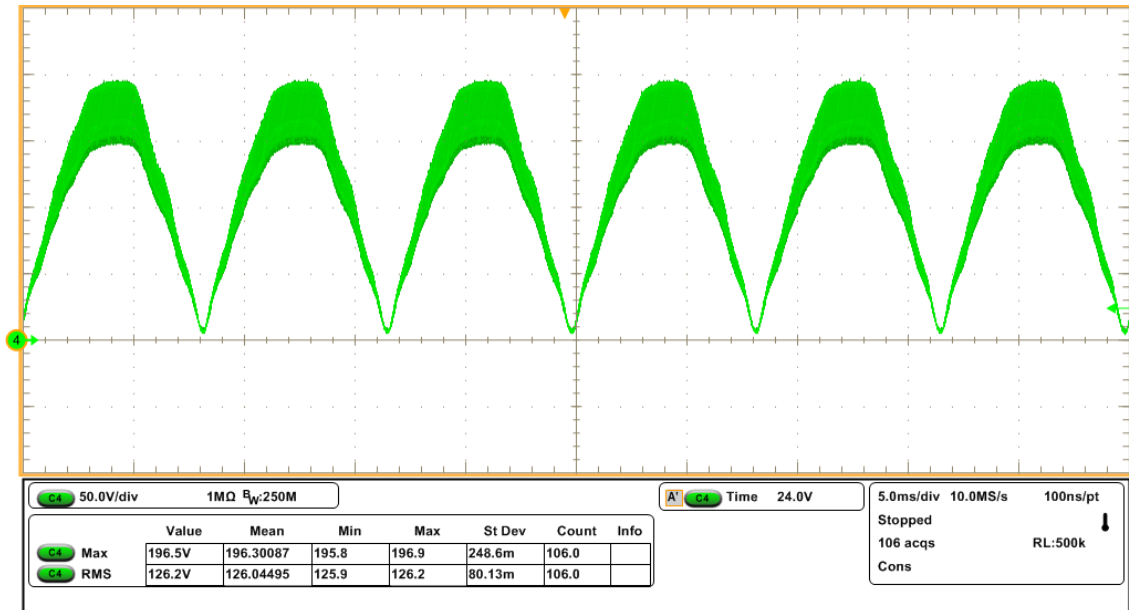


Figura 85 - Tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

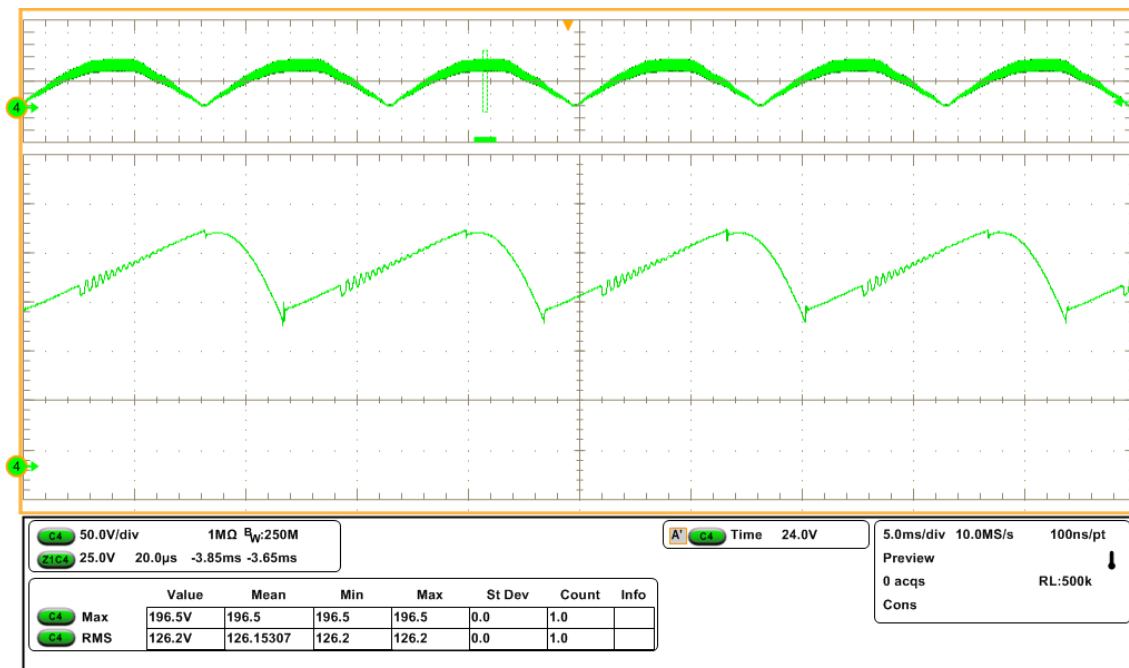


Figura 86 - Ondulação da tensão no capacitor C_i do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A forma de onda da corrente no indutor L_o com seu detalhe de ondulação em 20 kHz é exibida na Figura 87 e na Figura 88. A corrente apresenta envoltória senoidal com ondulação em alta frequência e valor máximo de 20,29 A.

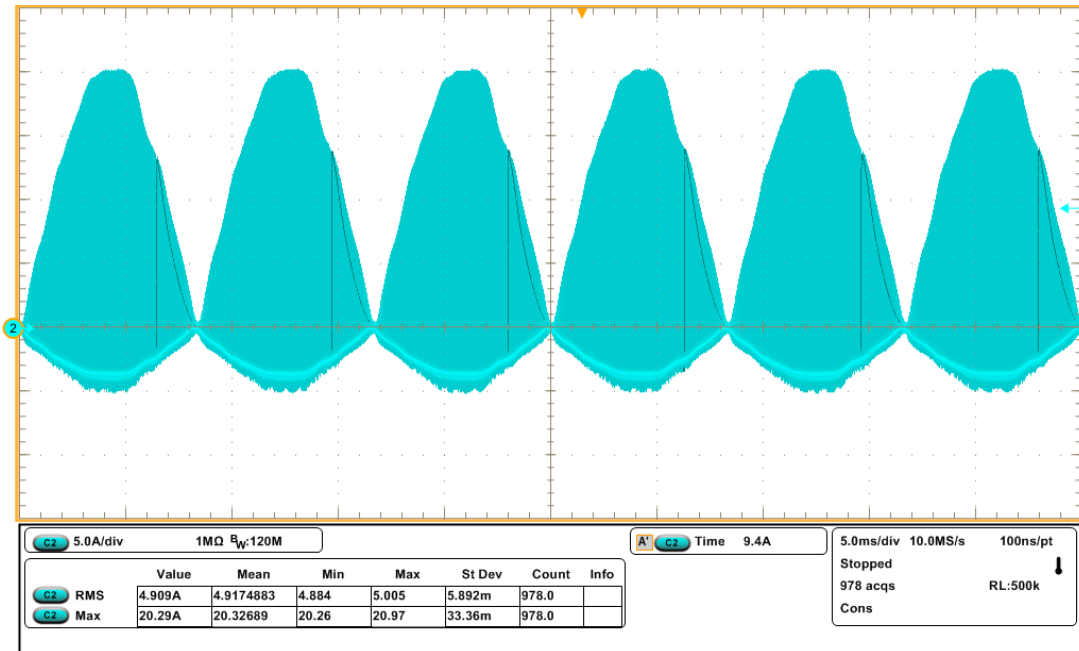


Figura 87 - Corrente no indutor L_o do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

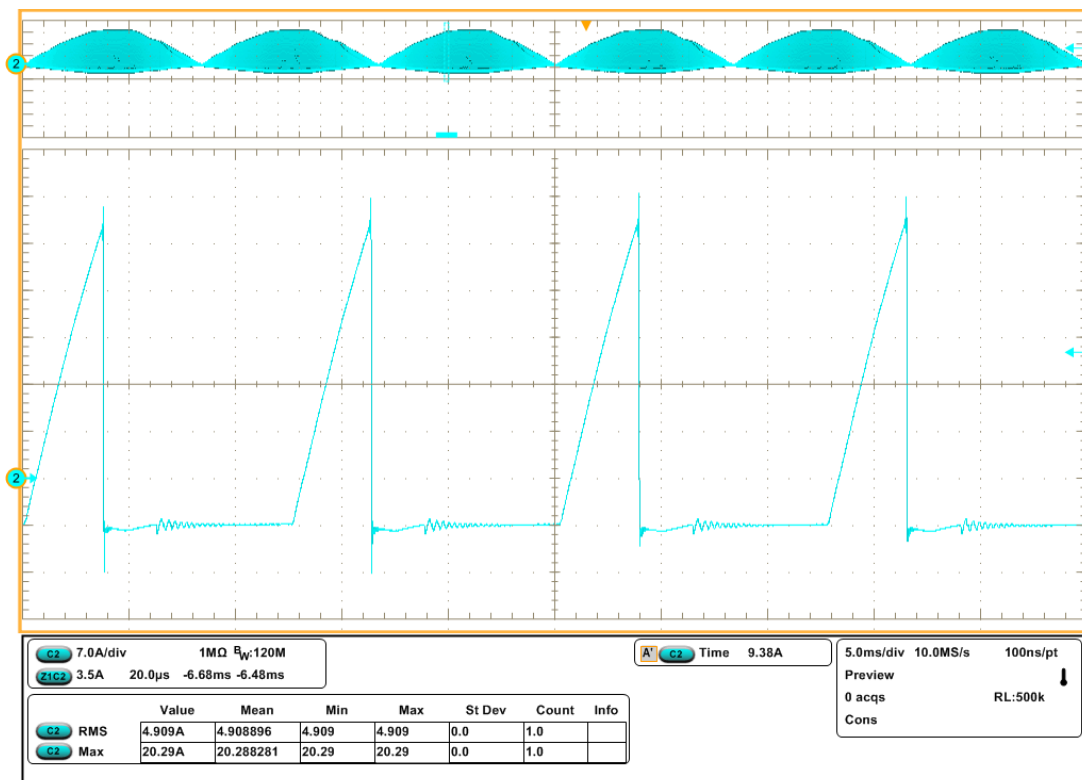


Figura 88 - Ondulação da corrente no indutor L_o do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

A Figura 89 e a Figura 90 estão representando a forma de onda da tensão no diodo D, com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Percebe-se que o valor máximo em módulo da tensão é 448,40 V.

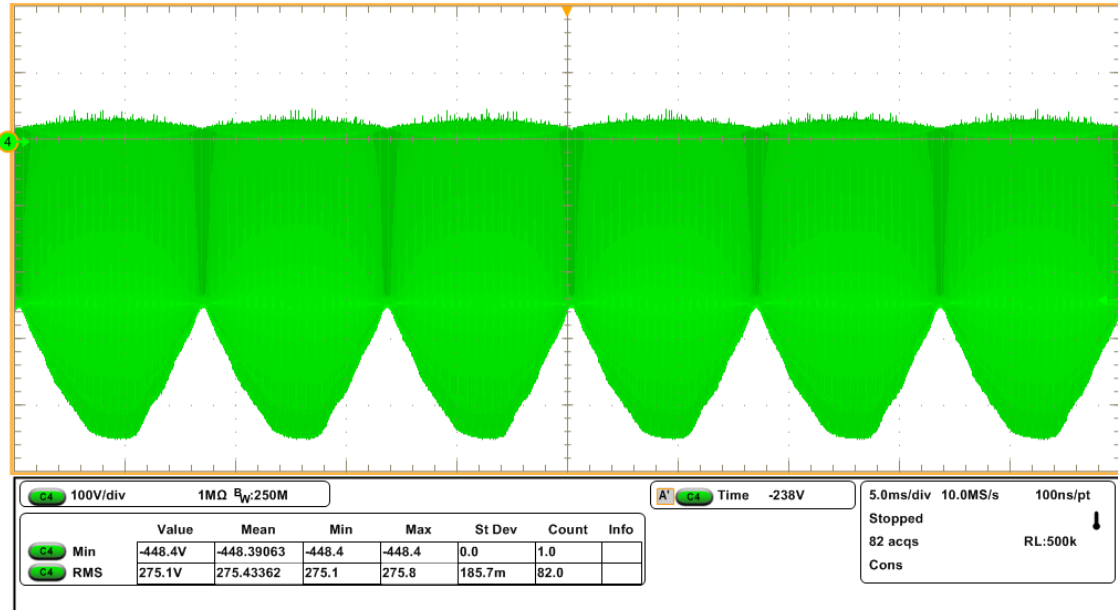


Figura 89 - Tensão no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

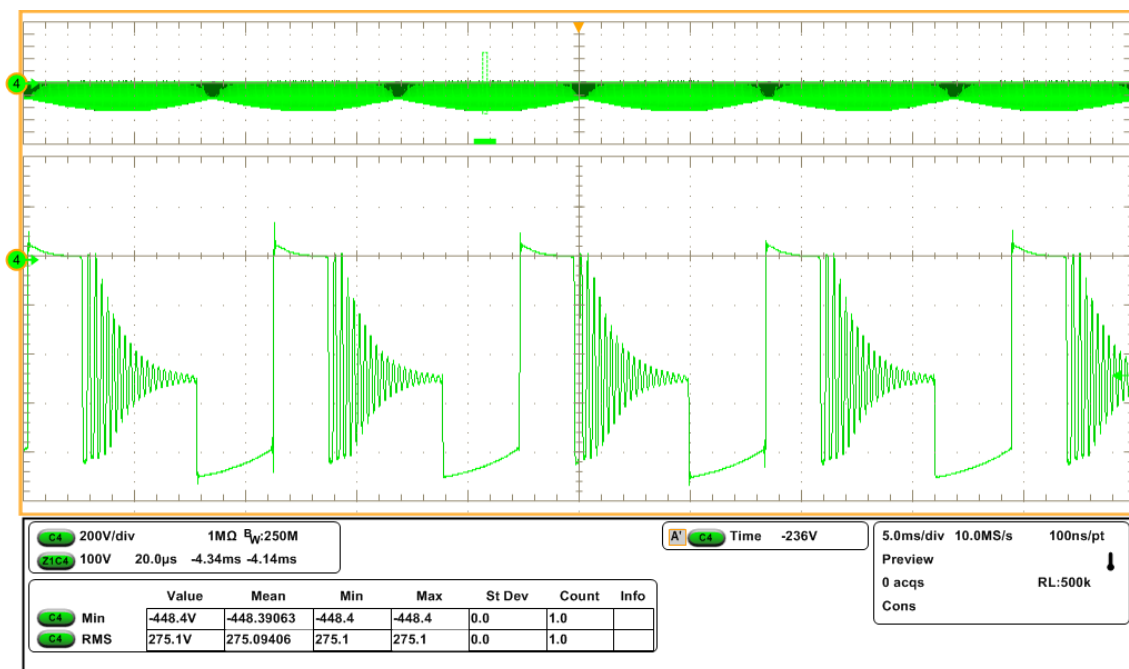


Figura 90 - Ondulação da tensão no diodo D do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Através da Figura 91 e da Figura 92 é reproduzida a forma de onda da corrente no diodo D, com seu detalhe de ondulação em 20 kHz. Nota-se que a corrente possui envoltória senoidal com ondulação em alta frequência e valor máximo de 25,52 A.

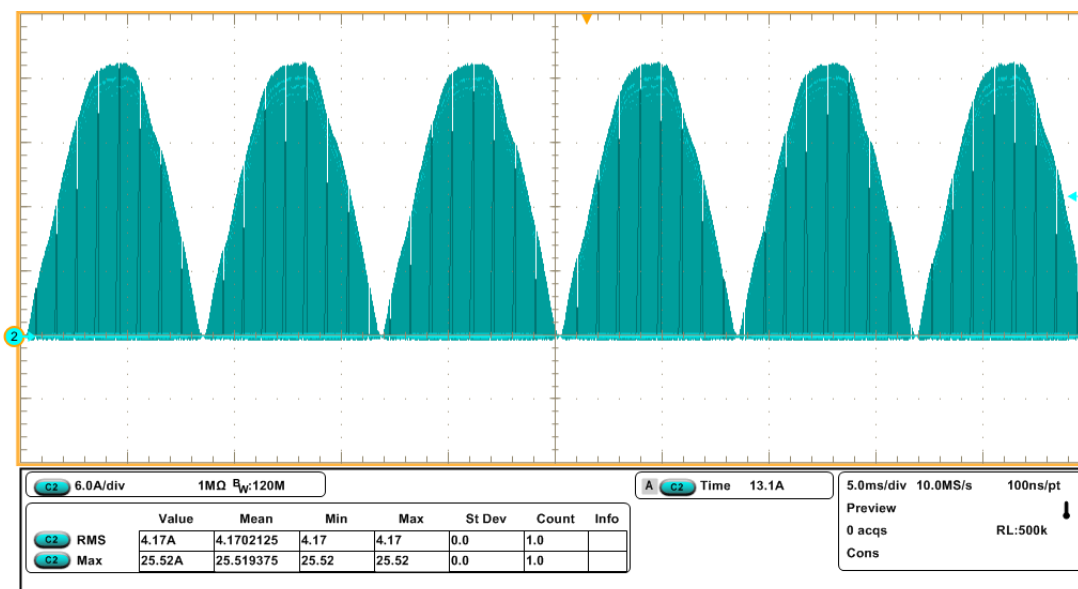


Figura 91 - Corrente no diodo D do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

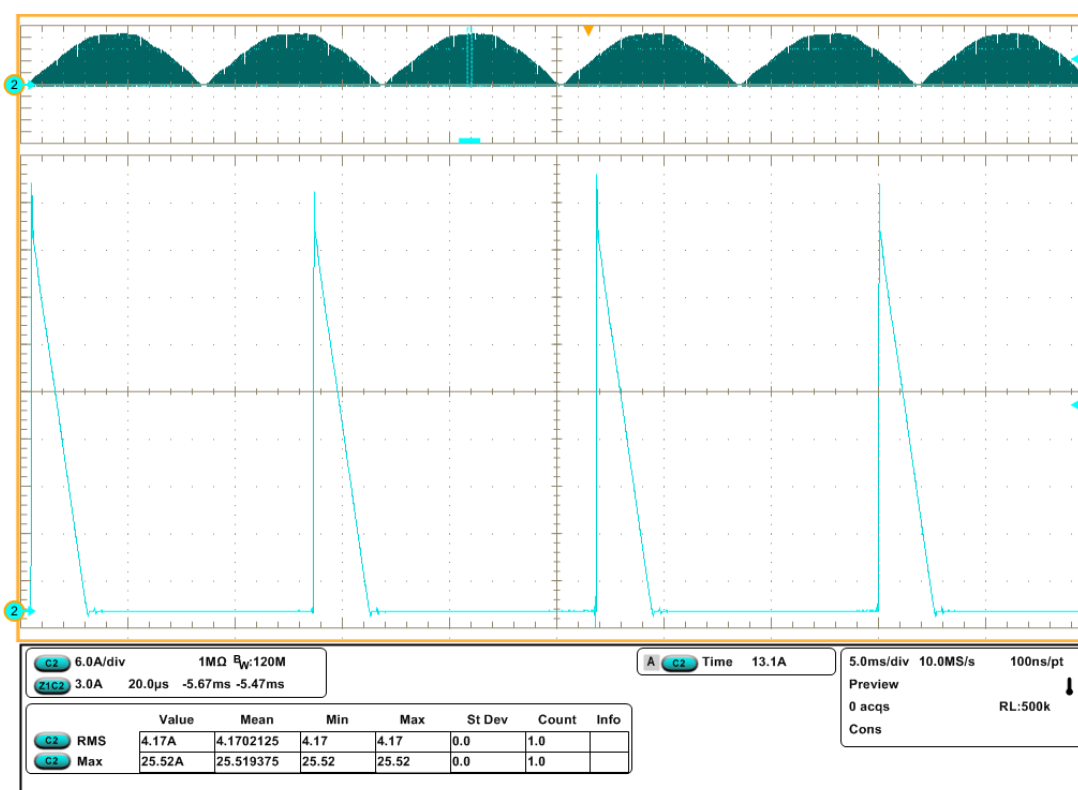


Figura 92 - Ondulação da corrente no diodo D do retificador SEPIC
 Fonte: Autoria própria

Por fim, o resultado conquistado na saída do retificador, quer dizer, a corrente e a tensão oferecida à carga, é mostrado na Figura 93. O valor médio da corrente na saída é 1,20 A e o valor médio da tensão é 249,10 V, logo, a potência processada é 298,92 W.

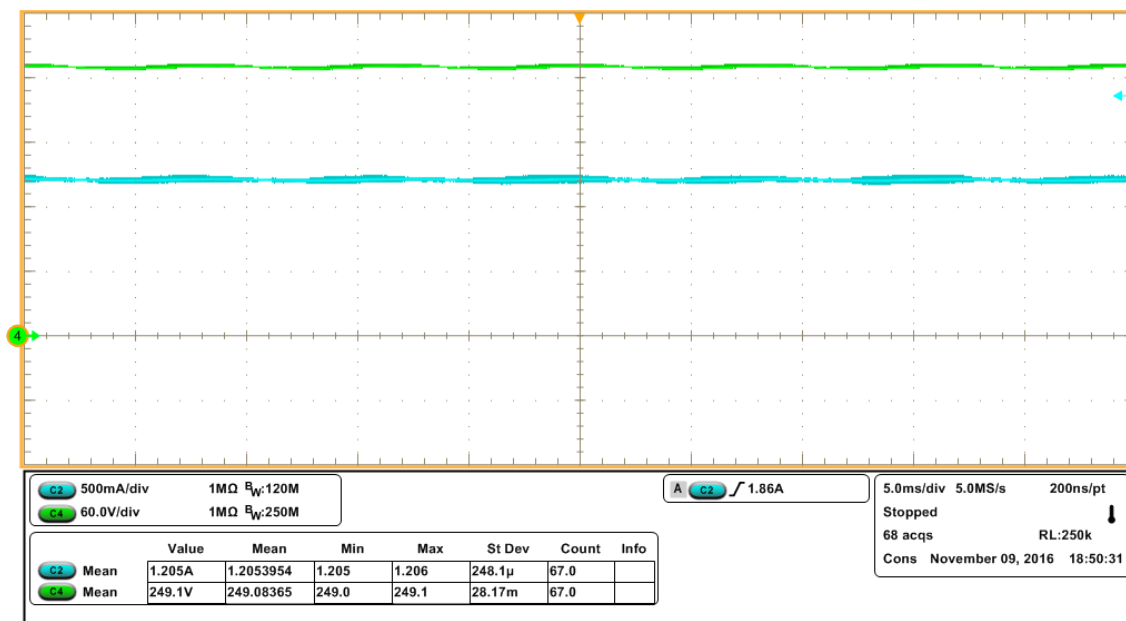


Figura 93 - Corrente e tensão na saída do retificador SEPIC
Fonte: Autoria própria

Os valores eficazes e máximos das grandezas mensuradas durante os testes realizados em laboratório são apresentados na Tabela 12. Observa-se que existe uma pequena diferença entre os valores experimentais com os valores teóricos, não oferecendo nenhum risco de degradação aos elementos da estrutura. A maior diferença de valores ocorre na medição da corrente eficaz na entrada do retificador com 14,35 % de erro, já na saída do retificador, os valores experimentais e teóricos são muito semelhantes.

Tabela 12 - Valores das grandezas obtidos em laboratório do retificador SEPIC

Grandeza	Valor teórico	Valor experimental	Erro (%)
Corrente eficaz na entrada	2,37 A	2,71 A	14,35
Corrente máxima na entrada	3,85 A	4,33 A	12,47
Corrente eficaz em L_i	2,37 A	2,61 A	10,13
Corrente máxima em L_i	3,85 A	4,21 A	9,35
Tensão máxima em S	429,60 V	421,30 V	1,93
Corrente eficaz em S	5,15 A	5,77 A	12,04
Corrente máxima em S	23,86 A	24,68 A	3,44
Tensão máxima em C_i	215,53 V	196,50 V	8,83
Corrente eficaz em L_o	5,37 A	4,91 A	8,57
Corrente máxima em L_o	20,01 A	20,29 A	1,34
Tensão máxima em D (em módulo)	465,53 V	448,40 V	3,68

Tabela 12 – Valores das grandezas obtidos em laboratório do retificador SEPIC

Grandeza	Valor teórico	Valor experimental	(conclusão) Erro (%)
Corrente eficaz em D	4,02 A	4,17 A	3,73
Corrente máxima em D	23,86 A	25,52 A	6,96
Corrente média na saída	1,20 A	1,20 A	0
Tensão média na saída	250 V	249,10 V	0,36

Fonte: Autoria própria

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme enunciado no início, o objetivo deste trabalho concentra-se na realização de uma análise comparativa entre os resultados experimentais do rendimento, da taxa de distorção harmônica e do fator de potência de três topologias de retificadores monofásicos em MCD. As topologias são compostas pelo retificador Boost com duas metodologias de filtro na entrada e pelo retificador SEPIC.

A partir dos dados coletados ao longo do trabalho é possível confirmar que os resultados obtidos analiticamente, por meio de simulação numérica e através dos resultados experimentais são muito semelhantes. Assim sendo, pode-se afirmar que as análises e equacionamento desenvolvidos para os retificadores estão em concordância.

Verifica-se que os elementos ativos armazenadores de energia, interruptores e diodos são submetidos a esforços de corrente e tensão diferenciados. Sendo que, existe pequena diferença no esforço de corrente nos indutores submetidos à frequência da fonte de alimentação. Entretanto, para o retificador SEPIC, é maior o esforço de corrente no indutor submetido às ondulações de alta frequência, de corrente e tensão no interruptor S e no diodo D.

A Figura 92 mostra as curvas experimentais do rendimento em função da potência na saída para os retificadores analisados. É possível observar que o retificador Boost utilizando a primeira metodologia de filtro na entrada possui maior rendimento para todas as potências na carga, alcançando 95,7% de rendimento na potência nominal. Em seguida, operando em potência nominal, tem-se o retificador Boost usando a segunda metodologia de filtro na entrada com 94,7% de rendimento, por último encontra-se o retificador SEPIC com 88,66% de rendimento. O retificador SEPIC obteve menor rendimento devido aos maiores esforços de corrente e tensão que seus componentes foram submetidos. Verifica-se ainda que para as três topologias estudadas, o rendimento teve um comportamento constante com os diferentes valores de carga acoplados na saída dos retificadores.

Destaca-se ainda, que os retificadores operam no modo de condução descontínuo, com comutação dissipativa e sem circuitos de ajuda à comutação, assim sendo, possuem maiores perdas devido aos maiores esforços de correntes que os elementos das estruturas são submetidos.

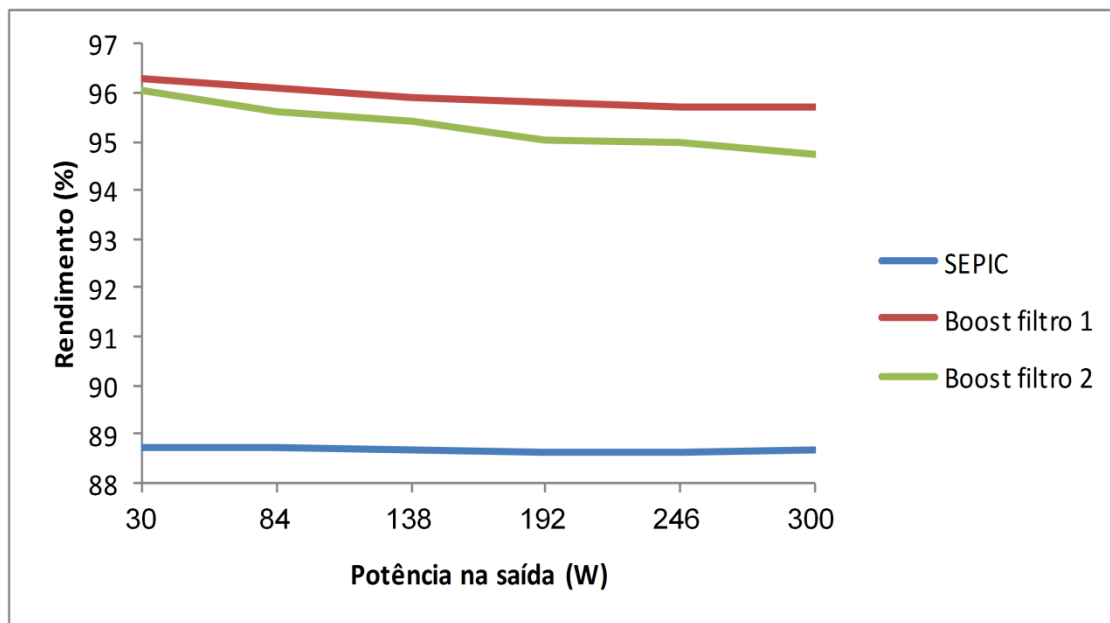


Figura 94 - Rendimento dos retificadores
Fonte: Autoria própria

Através da Figura 93, são exibidas as curvas experimentais da taxa de distorção harmônica da corrente na entrada dos retificadores em função da potência na carga. Percebe-se que o retificador SEPIC apresenta menor TDH para a corrente na entrada durante toda faixa de operação. Para menores valores de carga o retificador SEPIC apresentou maiores valores de TDH, iniciando com 10,87% para carga de 30W, aumentando-se o valor da carga o retificador obteve menores valores de TDH, atingindo 1,69% com o retificador operando em potência nominal. Sequencialmente, operando em potência nominal, encontra-se o retificador Boost usando a primeira metodologia de filtro na entrada com 20,12% de TDH, por último tem-se o retificador Boost usando a segunda metodologia de filtro na entrada com 21,94% de TDH. O retificador Boost obteve valores mais elevados de TDH devido ao fato da corrente na entrada não possuir o formato de uma senoide ideal. O retificador Boost apresentou pequena diferença entre os valores de TDH para as duas metodologias de filtro. Além disso, suas curvas de TDH mantiveram-se praticamente constantes para os diferentes valores de carga utilizados na saída do retificador.

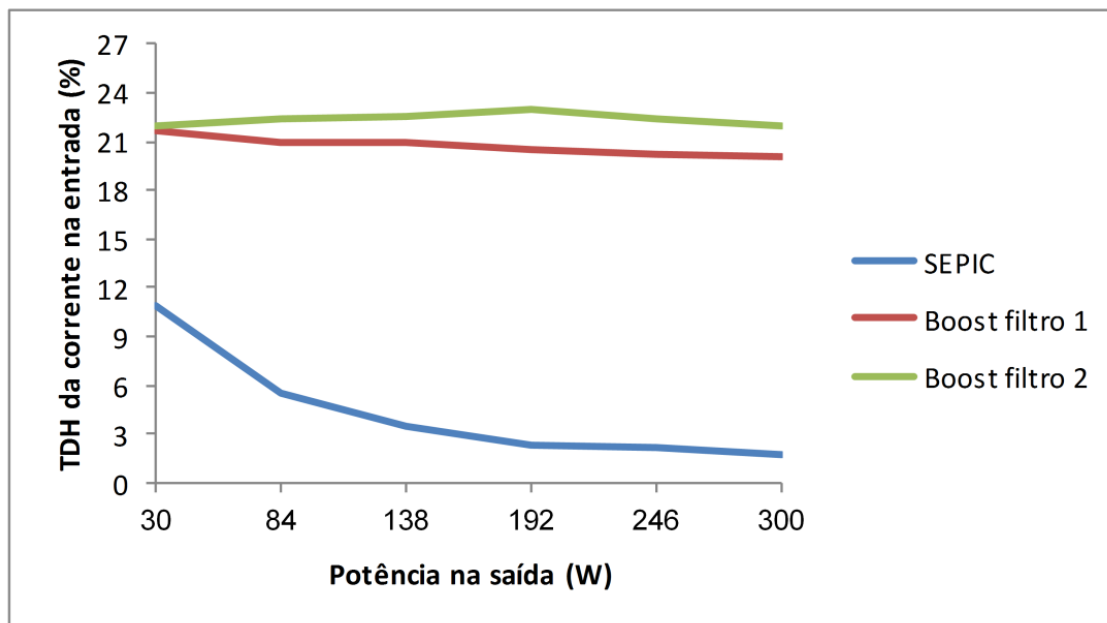


Figura 95 - TDH dos retificadores
 Fonte: Autoria própria

Apresentam-se por meio da Figura 94, as curvas experimentais do fator de potência dos retificadores em função da potência presente na carga. Verifica-se que o retificador SEPIC possui maior fator de potência em praticamente toda faixa de operação. Para menores valores de carga o retificador SEPIC também apresentou menores valores do fator de potência. Primeiramente, para carga de 30W o retificador SEPIC apresentou fator de potência de 0,9644, aumentando-se o valor da carga o retificador conquistou maiores valores para o fator de potência, atingindo 0,9988 quando operando em potência nominal. Na sequência, operando em potência nominal, tem-se o retificador Boost usando a primeira metodologia de filtro na entrada com 0,9728 de fator de potência, por último encontra-se o retificador Boost usando a segunda metodologia de filtro na entrada com fator de potência de 0,9696. O retificador Boost obteve menores valores de fator de potência porque apresentou maiores valores de TDH, pois fator de potência e TDH são diretamente proporcionais. O retificador Boost apresentou pequena diferença entre os valores de fator de potência nas duas metodologias de filtro, além disso, suas curvas de fator de potência tiveram poucas variações para os diferentes valores de carga utilizados na saída do retificador.

Atribui-se ao elevado fator de potência encontrado em todas as topologias dos retificadores estudados, a propriedade que eles possuem de emular uma carga resistiva quando operam no modo de condução descontínuo, drenando correntes senoidais em fase com a tensão na entrada dos retificadores sem a imposição de um sistema de controle de corrente.

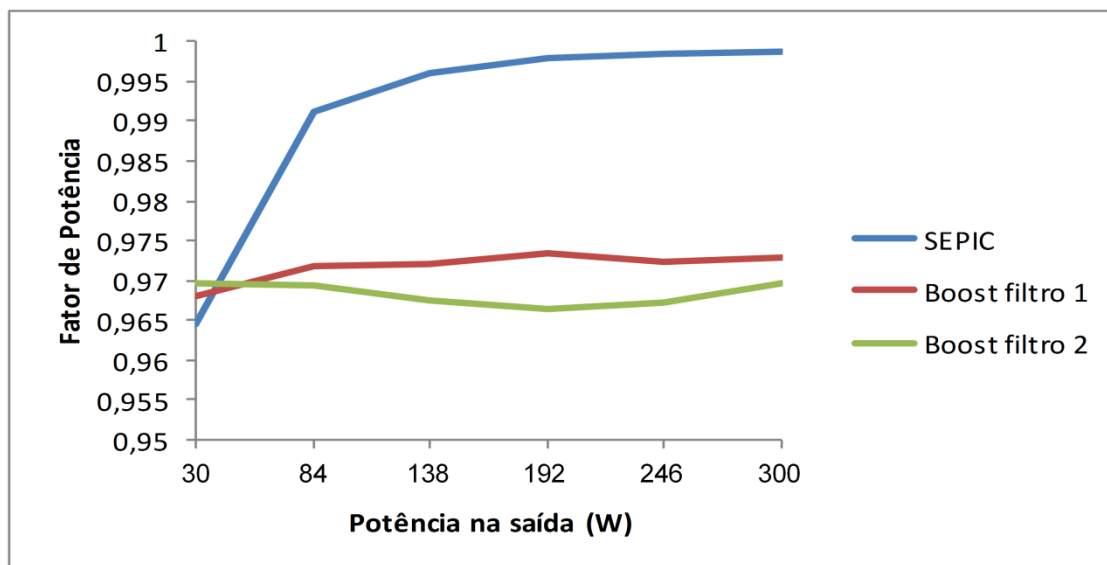


Figura 96 - Fator de potência dos retificadores
Fonte: Autoria própria

Não existe um retificador que seja o melhor para tudo. Se o objetivo é utilizar um retificador com maior rendimento, então o retificador Boost usando a primeira metodologia de cálculo para o filtro na entrada é o mais adequado. Porém, se é mais importante utilizar um retificador com melhor qualidade da corrente na entrada, com maior fator de potência e menor TDH, é indicado o retificador SEPIC.

Para futuros trabalhos, tem-se o desafio de obter a função de transferência dos retificadores, fechar a malha de realimentação e construir um sistema de controle, podendo ser analógico ou digital.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, Gabriel de Oliveira; CORRÊA, Gilvan dos Santos. **Estudo e implementação de dois filtros ativos de potência paralelos monofásicos, um conectado do lado da rede (lado CA) e outro no lado da carga (lado CC)**. 2013. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

BARBI, Ivo. **Correção ativa do fator de potência retificadores monofásicos operando em condução descontínua**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. (Apostila).

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas**. Ed. do Autor. Florianópolis, 2001.

BARBI, Ivo; ILLA FONT, Carlos Henrique; ALVES, Ricardo Luiz. **Projeto Físico de Indutores e Transformadores**. Florianópolis: Instituto de Eletrônica de Potência - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. (Apostila).

BATSCHAUER, Alessandro Luiz; NETO, Anis César Chehab; PETRY, Clóvis Antônio; SOUZA, Alexandre Ferrari de. **Conversor Boost operando em condução descontínua e malha aberta aplicado à correção de fator de potência**. Florianópolis: Instituto de Eletrônica de Potência - Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. (Apostila).

COSTA, Paulo Junior Silva. **Retificadores SEPIC monofásicos e trifásicos aplicados no processamento da energia elétrica proveniente de aerogeradores de pequeno porte**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

COSTA, Paulo Junior Silva; BATISTA, Flávio Alberto Bardemaker; ILLA FONT, Carlos Henrique. **Retificadores SEPIC com elevado fator de potência com um e dois interruptores controlados operando no modo de condução descontínua**. XI IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2014. p. 1-8, 2014.

DUARTE, Janderson. **Correção do fator de potência para cargas não lineares**. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwie_LSsh63MAhUDFZAKHdNXBaYQFgghMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.joinville.udesc.br%2Fportal%2Fprofessores%2Fjanderson%2Fmateriais%2FCFP__Capitulo_4__Conversor_Boost_em_conducao_continua.ppt&usq=AFQjCNF2xdLUP4zKjBH7xYIAI4wakNWkRQ&sig2=6ly05W7c45iifR_2-DAOGw&bvm=bv.120551593,d.Y2I>. Acesso em: 02 dez. 2015.

FRIEDLI, Thomas; HARTMANN, Michael; KOLAR, Johann W. **The essence of three-phase PFC rectifier systems – part II**. IEEE Transactions on Power Electronics. v. 29, n. 2, p. 543 – 560, fev. 2014.

ILLA FONT, Carlo Henrique. **Retificadores trifásicos híbridos bidirecionais com fator de potência unitário**. 2009. 202 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

KOLAR, Johann W.; Friedli, Thomas. **The essence of three-phase PFC rectifier systems – part I**. IEEE Transactions on Power Electronics. v. 28, n. 1, p. 176 – 198, jan. 2013.

KREMES, Willian de Jesus. **Sistema de carregamento de bateria de veículos elétricos/híbridos: carregador de estágio único baseado no conversor Cúk em MCD**. 2014. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

LANGE, André de Bastiani. **Retificador PFC monofásico PWM bridgelles três-níveis de alto desempenho**. 2012. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

MELO, Guilherme de Azevedo e. **Retificador entrelaçado Boost, no modo de condução descontínua com técnica de correção da corrente de entrada e elevado fator de potência, para aplicação em Sistema Trólebus**. 2010. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2010.

MELO, Nelber Ximenes. **Conversor Boost para mitigação de afundamentos de tensão em acionamentos de velocidade variável**. 2007. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

ORTMANN, Márcio Silveira; SOEIRO, Thiago Batista; HELDWEIN, Marcelo Lobo. **High switches utilization single-phase PWM Boost-type PFC rectifier topologies multiplying the switching frequency**. IEEE Transactions on Power Electronics. v. 29, n. 11, p. 5749 – 5760, nov. 2014.

PEREIRA, Vanderson Damião; COSTA, Paulo Junior Silva; BATISTA, Flávio Alberto Bardemaker; ILLA FONT, Carlos Henrique. **Técnicas de modulação PWM aplicadas à um retificador trifásico SEPIC com elevado fator de potência operando no modo de operação descontínua**. SEA – Seminário de Eletrônica e automação. Ponta Grossa (PR), set. 2015.

POSTIGLIONE, Cícero da Silveira. **Fonte de alimentação de estágio único com correção do fator de potência**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

RECH, Cassiano. **Correção do fator de potência para cargas não lineares**. Disponível em: < http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/mezaroba/materiais/CFP___Conversor_Boost_em_conducao_descontinua.pdf >. Acesso em: 02 dez. 2015.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

SILVA, Marcel Antônio Cardoso da. **Estudo de uma fonte de alimentação de estágio único utilizando o conversor SEPIC**. 2014. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

SIMONETTI, Domingos Savio Lyrio; SEBASTIAN, Javier; UCEDA, Javier. **The discontinuous conduction mode SEPIC and Cuk power factor preregulators: analysis and design**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. v. 44, n. 5, p. 630 – 637, out. 1997.

SINGH, Bhim; SINGH, Brij N.; CHANDRA, Ambrish; AL-HADDAD, Kamal; PANDEY, Ashish; KOTHARI, Dwarka P. **A review of single-phase improved power quality AC-DC converters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. v. 50, n. 5, p. 962 – 981, out. 2003.

SINGH, Bhim; SINGH, Brij N.; CHANDRA, Ambrish; AL-HADDAD, Kamal; PANDEY, Ashish; KOTHARI, Dwarka P. **A review of three-phase improved power quality AC-DC converters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. v. 51, n. 3, p. 64 – 660, jun. 2004.

VIDAL, Edward Leonardo Fuentealba. **Retificadores monofásicos e trifásicos com carga diferencial controlados por regime de deslizamento: Análise, projeto e implementação**. 2008. 225 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.