

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CÉLIO DEGARAES

**PROJETO DE SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO PARA
LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE LUMINOSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

CÉLIO DEGARAES

**PROJETO DE SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO
PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE
FATOR DE POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE
LUMINOSA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Diogo Vargas.
Coorientador: Juliano Lopes.

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE LUMINOSA**, do aluno **CÉLIO DEGARAES** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **57** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Diogo Ribeiro Vargas

Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Gustavo Weber Denardin

A ATA assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CÉLIO DEGARAES

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO PARA
LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE LUMINOSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2014**

CÉLIO DEGARAES

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO PARA
LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE LUMINOSA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Diogo Vargas.
Coorientador: Juliano Lopes.

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA E CONTROLE DE INTENSIDADE LUMINOSA**, do aluno **CÉLIO DEGARAES** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **57** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Diogo Ribeiro Vargas

Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Gustavo Weber Denardin

RESUMO

DEGARAES, Célio A. Projeto e Simulação de um Reator Eletrônico para Lâmpadas Fluorescentes com Correção de Fator de Potência e Controle de Intensidade Luminosa. 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Este trabalho trata do projeto e simulação de um reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes, com correção de fator de potência e controle de intensidade luminosa. Para a correção do fator de potência é empregado um conversor SEPIC, operando no modo de condução descontínuo de corrente. O acionamento da lâmpada fluorescente será através de um inversor meia ponte com um filtro ressonante LC série e C paralelo, considerando a máxima corrente que pode circular pelo filamento e capacitor paralelo, visando a integridade e aumento da vida útil da lâmpada. O controle da intensidade luminosa é efetuado pela variação da tensão de barramento do conversor SEPIC, que por sua vez, terá sua razão cíclica ajustada por um circuito auxiliar com um resistor dependente de luz. Simulações com um modelo da lâmpada fluorescente serão realizadas para avaliar o comportamento do reator. Após o projeto e a simulação das topologias citadas, os resultados são apresentados, discutidos e avaliados no que diz respeito as suas expectativas de projeto e o seu desempenho nas simulações.

Palavras-chaves: Conversor SEPIC, Fator de Potência, Inversor Meia Ponte, Filtro Ressonante LCC, Resistência Equivalente, Ajuste da Razão Cíclica, Indutor Ressonante.

ABSTRACT

DEGARAES, Célio A. Design and Simulation of an Electronic Ballast for Fluorescent Lamps with Power Factor Correction and Control of Luminous Intensity. 2014. Monograph (Work Completion of Course) - Degree in Electrical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

This paper deals with the design and simulation of an electronic ballast for fluorescent lamps with power factor correction and control of light intensity. For the correction of the power factor is employed a SEPIC converter operating in discontinuous conduction mode current. The drive of the fluorescent lamp will be through a half bridge inverter with LC series C parallel resonant filter, considering the maximum current that can flow through the filament and parallel capacitor, at aim the integrity and increased lamp life. The light intensity control is effected by varying the bus voltage of the SEPIC converter, which in turn, have the duty cycle set by an auxiliary circuit with a light dependent resistor. Simulations with a model of fluorescent lamp will be conducted to evaluate the behavior of the reactor. After the design and simulation of the mentioned topologies, the results will be presented, discussed and evaluated regarding their expectations of project and their behavior in simulations.

Keywords: SEPIC Converter, Power Factor, Half Bridge Inverter, LCC Resonant Filter, Equivalent Resistance, Duty Cycle Adjustment, Resonant Inductor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama representativo do reator eletrônico proposto	11
Figura 2: Conversor SEPIC como PFP	14
Figura 3: Circuito equivalente do conversor SEPIC	14
Figura 4: Circuito equivalente de ressonância entre L_E , C_1 e L_M	18
Figura 5: Circuito do Conversor SEPIC simulado no <i>software</i> PSIM [®]	20
Figura 6: Tensão e corrente de entrada do conversor SEPIC PFP	21
Figura 7: Espectro da corrente I_{in} do conversor SEPIC (1° ao 40° harmônico).....	21
Figura 8: Espectro da corrente I_{in} do conversor SEPIC (3° ao 39° harmônico).....	22
Figura 9: Tensão de saída do conversor SEPIC PFP.....	22
Figura 10: Corrente de entrada na partida do conversor SEPIC.....	23
Figura 11: Corrente pelo diodo D e pela chave S.....	23
Figura 12: (a) Tensão na chave S. (b) Tensão no diodo D	24
Figura 13: Harmônicos medidos e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2	26
Figura 14: Inversor meia ponte com filtro LCC.....	27
Figura 15: Etapas de operação do inversor e filtro LCC.....	28
Figura 16: Filtro LCC	29
Figura 17: Circuito série modificado do filtro LCC	29
Figura 18: Filtro LCC com o detalhe de I_{LH} , I_D e I_{LL}	35
Figura 19: Circuito do inversor simulado no <i>software</i> PSIM [®]	37
Figura 20: Tensão e corrente na lâmpada fluorescente	38
Figura 21: Tensão de ignição na lâmpada fluorescente	39
Figura 22: Corrente e tensão de entrada do filtro LCC.....	39
Figura 23: (a) e (b) Corrente e tensão nas chaves S1 e S2	42
Figura 24: Circuito do inversor, filtro ressonante e modelo da lâmpada	43
Figura 25: (a) e (b) Tensão e corrente na partida da lâmpada (V_{bus} 300 V).....	44
Figura 26: (a) e (b) Tensão e corrente na lâmpada em regime permanente (V_{bus} 300 V).....	44
Figura 27: Potência na lâmpada (V_{bus} 300 V)	45
Figura 28: (a) e (b) Tensão e corrente na partida da lâmpada (V_{bus} 150 V).....	45
Figura 29: (a) e (b) Tensão e corrente na lâmpada em regime permanente (V_{bus} 150V)	46
Figura 30: Potência na lâmpada (V_{bus} 150 V)	46
Figura 31: Variação da resistência de um LDR em função da iluminância média	48
Figura 32: Tensão analógica obtida em função da resistência do LDR.....	48
Figura 33: Circuito de seleção de razão cíclica	49
Figura 34: Circuito completo do reator eletrônico.....	49
Figura 35: (a) Tensão, e (b) corrente na partida da lâmpada ($D = 0,3$)	50
Figura 36: (a) Tensão, e (b) corrente na lâmpada em regime permanente ($D = 0,3$)	50
Figura 37: Potência na lâmpada em regime permanente ($D = 0,3$).....	51
Figura 38: Tensão de saída do conversor SEPIC em regime permanente ($D = 0,3$).....	51
Figura 39: Tensão e corrente de entrada do reator ($D = 0,3$)	52
Figura 40: Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (1° ao 40° harmônico)	52
Figura 41: Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (3° ao 39° harmônico).....	53
Figura 42: (a) Tensão, e (b) corrente na partida da lâmpada ($D = 0,2$)	53
Figura 43: (a) Tensão, e (b) corrente na lâmpada em regime permanente ($D = 0,2$)	54
Figura 44: Potência na lâmpada em regime permanente ($D = 0,2$).....	54
Figura 45: Tensão de saída do conversor SEPIC em regime permanente ($D = 0,2$).....	55
Figura 46: Tensão e corrente de entrada do reator ($D = 0,2$)	55
Figura 47: Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (1° ao 40° harmônico).....	56

Figura 48: Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (3° ao 39° harmônico).....	56
Figura 49: Harmônicos medidos e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2	58

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1: Comparativo da eficiência energética de diversos tipos de lâmpadas..... 10
Gráfico 2: variação da resistência de um LDR em função da iluminância média47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos componentes para o conversor SEPIC PFP	20
Tabela 2: Valores de projeto e simulados para o conversor SEPIC PFP	25
Tabela 3: Valores dos componentes projetados do filtro LCC	37
Tabela 4: Valores especificados ou calculados e de simulação para o filtro LCC	41
Tabela 5: Tensão e corrente do filtro na partida da lâmpada	41
Tabela 6: Valores de projeto e de simulação para o reator eletrônico ($D = 0,3$)	57
Tabela 7: Valores de projeto e de simulação para o reator eletrônico ($D = 0,2$)	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.2.1 Objetivos Específicos	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2 CIRCUITO DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA	13
2.1 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC	13
2.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR SEPIC	20
2.2.1 Análise dos Resultados	24
3 CIRCUITO INVERSOR E FILTRO RESSONANTE.....	27
3.1 PROJETO DO FILTRO RESSONANTE	28
3.2 SIMULAÇÃO DO INVERSOR E FILTRO RESSONANTE.....	37
3.2.1 Análise dos Resultados	40
4 DIMERIZAÇÃO DO REATOR E MODELO DA LÂMPADA	43
4.1 SIMULAÇÃO COM O MODELO DA LÂMPADA	43
4.2 CIRCUITO DE SELEÇÃO DE RAZÃO CÍCLICA.....	46
4.3 SIMULAÇÃO DO REATOR ELETRÔNICO	50
4.3.1 Análise dos Resultados	57
6 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS.....	62
APENDICE A	65

1 INTRODUÇÃO

Inúmeros esforços têm sido feitos pelos setores público e privado para conseguir melhorias no aproveitamento da energia elétrica, visando melhor eficiência tanto nos sistemas de geração e transmissão, quanto nos equipamentos e máquinas usados na indústria e também nas residências. O Plano Nacional de Eficiência Energética (PN&F), lançado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelece um conjunto de ações para uma série de áreas como: industrial, edificações, prédios públicos, iluminação pública e saneamento, fazendo orientações com o intuito de atingir metas de economia e eficiência energética (PN&F, 2011).

A iluminação artificial representa uma parcela significativa no consumo de energia elétrica. Estima-se que entre 20 e 30% de toda a energia elétrica produzida no mundo seja utilizada como iluminação artificial (ACHÃO, 2003), sendo que no Brasil, segundo o PN&F (2011), cerca de 17% da energia produzida é consumida para esse fim. Em virtude dessa demanda, cada vez mais é imprescindível que sejam empregadas técnicas adequadas para melhorar a eficiência dos dispositivos empregados nos sistemas de iluminação, culminando em um melhor aproveitamento e economia de energia elétrica. O MME lançou a portaria interministerial N° 1.007, e também a portaria N° 1.008, ambas de 31 de dezembro de 2010, tratando respectivamente das lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas, no que diz respeito aos níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética (MME, 2010). A portaria interministerial N° 1.007 determina ainda a proibição da fabricação e importação de lâmpadas incandescentes de potências de 150 e 200 watts. As lâmpadas de potências entre 60 e 100 watts, mais utilizadas em residências, devem seguir a mesma regra até junho de 2014 (MME, 2013).

No que diz respeito a alternativas para substituição dos atuais sistemas de iluminação menos eficientes, os LEDs vem alcançando boa projeção nos últimos anos, devido sua alta eficiência luminosa e vida útil, contudo, sua tecnologia ainda está em pleno desenvolvimento e a utilização dos LEDs para sistemas de iluminação ainda não está consolidada. Por esse fato pode-se afirmar que as lâmpadas fluorescentes irão dominar o mercado de sistemas de iluminação por alguns anos (POLONSKII, 2011).

De acordo com a fabricante de lâmpadas Osram, as lâmpadas fluorescentes são responsáveis por mais de 70% de toda a iluminação artificial utilizada no mundo, tendo uma durabilidade que varia de 5.000 a 25.000 horas em média, ao passo que uma lâmpada incandescente tem vida útil estimada em aproximadamente 1.000 horas (Osram, 2013). No Gráfico 1, mostrado a seguir, temos um comparativo da eficiência energética de diversos tipos de lâmpadas, em lm/W (lúmens/watt).

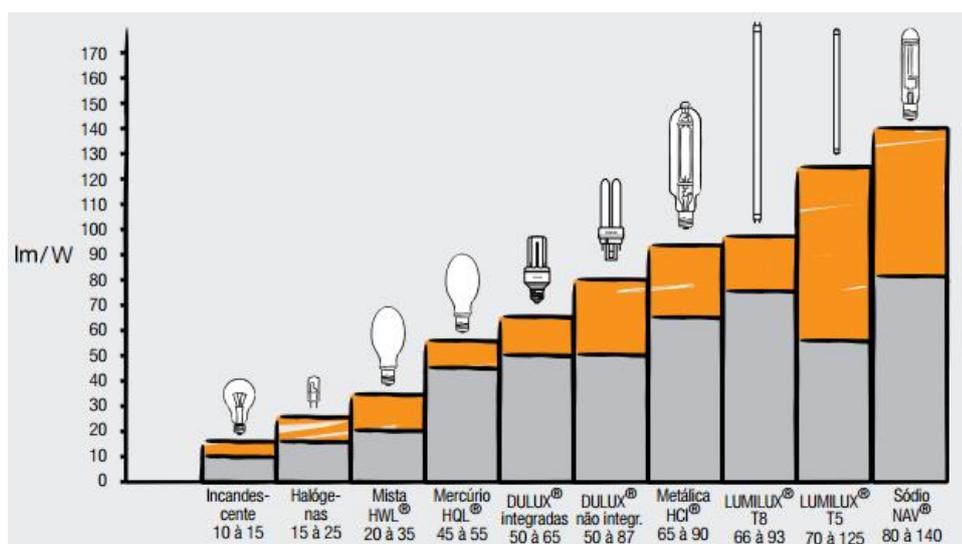


Gráfico 1 - Comparativo da eficiência energética de diversos tipos de lâmpadas.

Fonte: Osram, 2013.

As lâmpadas fluorescentes precisam de dispositivos, chamados de reatores, que realizam a ignição e limitam a corrente em regime permanente, e que podem ser eletrônicos ou eletromagnéticos. Os reatores eletromagnéticos, ainda utilizados, possuem características indesejáveis tais como ruído audível e cintilamento em baixa frequência. Os reatores eletrônicos, operando em alta frequência, podem ter o cintilamento reduzido a zero, melhor eficiência, menor peso e volume frente aos eletromagnéticos (LOPES, 2010).

A proposta deste trabalho trata do projeto e simulação de um reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes tubulares com controle de intensidade luminosa e correção do fator de potência. A Correção do Fator de Potência (CFP) é proporcionada pela utilização de um conversor CC-CC ligado ao inversor que alimenta a lâmpada, que, aliados ao controle da intensidade luminosa, favorecem a

economia e qualidade da energia elétrica. A Figura 1 mostra um diagrama representativo do reator eletrônico proposto.

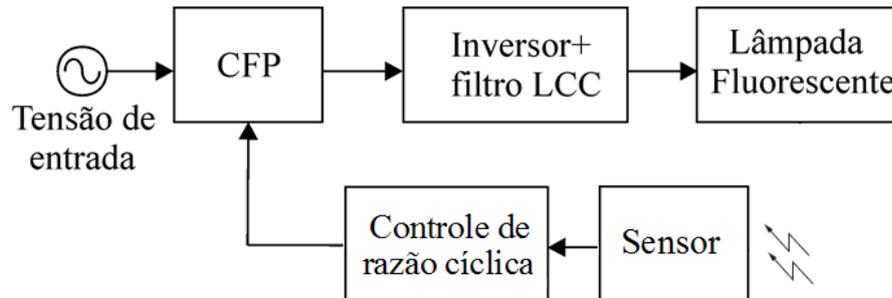


Figura 1. Diagrama representativo do reator eletrônico proposto.
Fonte: Autoria própria.

O alto Fator de Potência (FP) é necessário para atender a portaria n° 267/2009, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), que exige fator de potência maior que 0,92 para o conjunto lâmpada e reator com potência superior a 25 watts (MDIC, 2009), e a norma IEC 61000-3-2, a qual impõe limites às harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação (IEC, 1995).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é projetar e simular um reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes com correção de fator de potência e controle de intensidade luminosa, como uma alternativa de apoio a trabalhos posteriores de implementação de protótipos de reatores.

1.2.1 Objetivos Específicos

O trabalho será desenvolvido em partes definidas nos itens a seguir, que constituem os objetivos específicos.

- Projeto e simulação de um circuito de correção de fator de potência com um conversor SEPIC;

- Projeto e simulação de um inversor meia ponte com filtro LC série e C paralelo para acionamento da lâmpada;
- Desenvolvimento de um circuito auxiliar para controle de intensidade luminosa do reator eletrônico proposto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 do trabalho será realizado o projeto e simulação do conversor CC-CC SEPIC como Pré-regulador de Fator de Potência (PFP). No projeto, é efetuado o desenvolvimento das expressões matemáticas necessárias, conforme literatura, e o dimensionamento dos componentes passivos do conversor. Na simulação, serão testados os componentes dimensionados e vistos os valores de corrente, tensão, potência, etc.

No capítulo 3 é feito o projeto e a simulação do inversor meia ponte e filtro LCC. O projeto e a simulação seguem os mesmos passos da etapa anterior.

No capítulo 4, uma simulação é realizada com o inversor e o filtro ressonante com tensão de entrada CC e um modelo da lâmpada fluorescente. Posteriormente, o conversor SEPIC é ligado a um circuito de seleção de razão cíclica. O comando do conversor promove a variação da tensão de barramento, que por sua vez varia a tensão no filtro e possibilita a dimerização na lâmpada (variação de potência). Também, são realizadas simulações com os circuitos do PFP, inversor e modelo da lâmpada, interligados. Os valores medidos de FP e dos Harmônicos da corrente de entrada do reator são comparados, respectivamente, aos exigidos pela portaria nº 267/2009 e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2.

Na conclusão, um pequeno resumo sobre os resultados encontrados ou atingidos é realizado para cada capítulo, com base nas observações feitas no texto para a análise dos resultados.

2 CIRCUITO DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

A correção ativa do FP através de um conversor CC-CC é uma técnica aplicável em dispositivos e equipamentos, para a substituição das pontes retificadoras e filtro capacitivo, que suprem a tensão e corrente de alimentação. Os diodos da ponte retificadora conduzem por pouco tempo durante cada ciclo, resultando em correntes que não são senoidais e por consequência, causando uma alta Distorção Harmônica Total (DHT) (HART, 2012). A solução convencional, com ponte retificadora e filtro capacitivo, torna-se o grande responsável pela reduzida potência ativa entregue a carga (POMÍLIO, 2014).

Os reatores eletrônicos com o conjunto lâmpada e reator de potência superior a 25 W, enquadrados na portaria nº 267/2009 (MDIC, 2009), devem possuir um estágio CFP através de filtragem ou de um pré-regulador de fator de potência. Neste trabalho, é proposto o uso de um conversor SEPIC para o estágio CFP. Essa topologia possui características tais como: simplicidade, operação como abaixador ou elevador de tensão, entrada com característica de fonte de corrente implicando em baixa ondulação da corrente de entrada, saída com característica de fonte de tensão (BARBI, 2006). Além disso, o conversor SEPIC operando como PFP dispensa filtro de entrada, o acionamento da chave é na mesma referência do circuito de seleção de razão cíclica e a tensão de saída não sofre inversão de polaridade (LOPES et al., 2012).

2.1 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC

O emprego do conversor SEPIC como PFP emula uma carga resistiva em relação à rede elétrica, quando opera no Modo de Condução Descontínuo (MCD) (POMÍLIO, 2014), e garante alto FP na entrada (LOPES et al., 2012). Dessa forma, será adotado o MCD de corrente como parâmetro de projeto e a metodologia utilizada será conforme LOPES et al. (2012).

Na Figura 2 é mostrado o circuito do conversor SEPIC acoplado a ponte retificadora e ligado a rede elétrica.

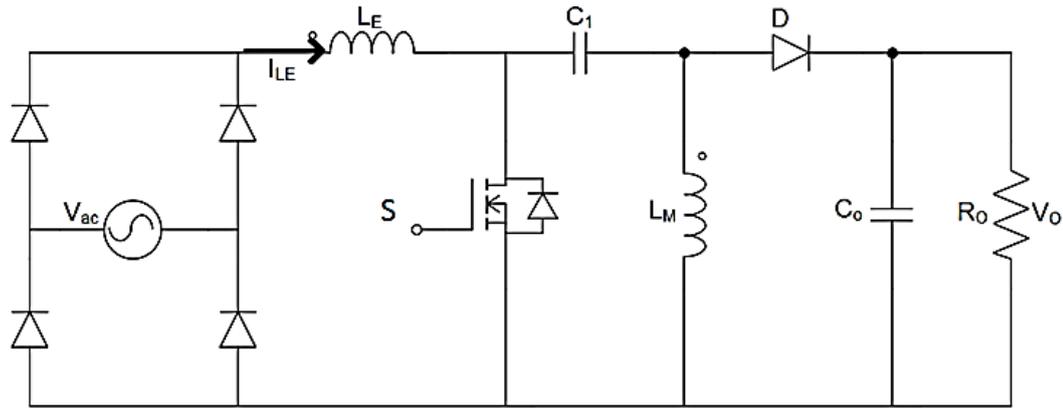


Figura 2. Conversor SEPIC como PFP.
Fonte: Adaptado de Pomílio, 2014.

Pode-se adotar um circuito equivalente do conversor SEPIC que leva em consideração a potência e a resistência equivalente na entrada, e a corrente média do conversor. O circuito é mostrado na Figura 3.

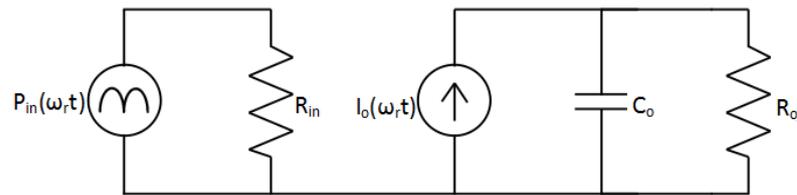


Figura 3. Circuito equivalente do conversor SEPIC.
Fonte: Adaptado de Lopes et al., 2012.

Onde:

- P_{in} - Potência de entrada, em watts (W);
- R_{in} - Resistência equivalente na entrada do conversor, em ohms (Ω);
- $I_o(\omega_r t)$ - Corrente média de saída, em amperes (A).
- C_o - Capacitor de saída;
- R_o - Resistência de carga.

Primeiramente, para definir a potência, são consideradas a tensão de pico senoidal retificada e a resistência equivalente na entrada conforme a Equação (1).

$$P_{in}(\omega_r t) = \frac{(|V_p \cdot \sin(\omega_r t)|)^2}{R_{in}}$$

Equação 1

No qual:

V_p - Tensão de pico, em volts;

ω_r - Frequência angular da rede elétrica, em rad/s.

A resistência equivalente é dada por:

$$R_{in} = \frac{V_{ret}}{I_{in\ med}}$$

Equação 2

No qual:

V_{ret} - Máximo valor da tensão retificada;

$I_{in\ med}$ - Corrente média na entrada.

As correntes de pico e média na entrada são, respectivamente:

$$I_{p\ in} = \frac{V_{ret}}{L_{eq}} \cdot DT$$

Equação 3

$$I_{in\ med} = \frac{V_{ret} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L_{eq}}$$

Equação 4

No qual:

L_{eq} - Indutância equivalente de L_E e L_M ;

D - Razão cíclica;

T - Período de chaveamento.

Substituindo a Equação (4) na Equação (2), obtemos uma nova expressão para a resistência equivalente do conversor em função de L_{eq} , D e T :

$$R_{in} = \frac{2 \cdot L_{eq}}{D^2 \cdot T}$$

Equação 5

Retomando a Equação (1) e considerando a Equação (5) temos:

$$P_{in}(\omega_r t) = \frac{(|V_p \cdot \sin(\omega_r t)|)^2}{2 \cdot L_{eq}} \cdot D^2 \cdot T$$

Equação 6

Supondo o conversor como ideal, no qual a potência de entrada é igual a de saída, logo:

$$P_o = V_o \cdot I_o(\omega_r t)$$

Equação 7

Onde:

- P_o - Potência de saída;
 V_o - Tensão de saída;

Dessa forma, podemos encontrar uma expressão para $I_o(\omega_r t)$ fazendo:

$$I_o(\omega_r t) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_{in}(\omega_r t)}{V_o} dt$$

Equação 8

Resolvendo a Equação (8) temos:

$$I_o(\omega_r t) = \frac{V_p^2 \cdot D^2 \cdot T}{4 \cdot L_{eq} \cdot V_o}$$

Equação 9

A tensão de saída pode ser determinada por:

$$V_o = R_o \cdot I_o(\omega_r t)$$

Equação 10

No qual:

R_o - Resistência de carga do conversor.

Manipulando a Equação (9) em (10), conseguimos uma expressão para a indutância equivalente:

$$L_{eq} = \frac{V_p^2 \cdot D^2 \cdot T \cdot R_0}{4 \cdot V_o^2}$$

Equação 11

Com a indutância equivalente entre L_E e L_M podemos escrever:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_E} + \frac{1}{L_M}$$

Equação 12

Assim, a indutância L_M fica determinada por:

$$L_M = \frac{L_E \cdot L_{eq}}{L_E - L_{eq}}$$

Equação 13

A indutância L_E pode ser expressa por:

$$L_E = \frac{V_p \cdot DT}{\Delta I_{in\ med}}$$

Equação 14

Onde:

$\Delta I_{in\ med}$ - Ondulação da corrente de entrada.

Conforme Pomílio (2014, pg 8), capacitor C_1 deve apresentar uma baixa ondulação de tensão na frequência de chaveamento, porém, deve ser pequeno o suficiente para acompanhar a variação da tensão de entrada. O autor ressalta ainda que as ressonâncias entre C_1 , L_E e L_M devem ser numa frequência maior que a da rede a fim de evitar oscilações na corrente de entrada, mas, as mesmas ressonâncias devem ser em frequência menor que a de chaveamento para garantir o funcionamento do conversor como PFP (POMÍLIO, 2014).

Um circuito equivalente que simplifica o conversor SEPIC a fim de mostrar a possível ressonância entre C_1 , L_E e L_M é mostrado a seguir.

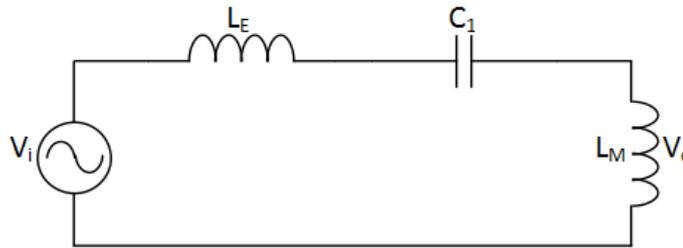


Figura 4. Circuito equivalente de ressonância entre L_E , C_1 e L_M .
Fonte: Autoria própria.

Então, o capacitor C_1 pode ser determinado fazendo-se uma simples análise de malha no domínio da frequência. A expressão a seguir define C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{\omega_{res}^2 \cdot (L_E + L_M)}$$

Equação 15

Onde:

ω_{res} - Frequência de ressonância angular.

O capacitor C_o deve ser dimensionado de forma a suprir a energia correspondente a corrente e tensão de saída para a carga, sendo dado por:

$$C_o = \frac{P_o}{f_r (V_{o\max}^2 - V_{o\min}^2)}$$

Equação 16

Onde:

$V_{o\max}$ - Máxima tensão de saída;

$V_{o\min}$ - Mínima tensão de saída;

f_r - Frequência da rede.

Segundo Barbi (2006, pg. 199), a máxima razão cíclica D_{max} , para garantir a operação do conversor no modo de condução descontínuo é dada por:

$$D_{max} = 1 - \sqrt{K_1}$$

Equação 17

Sendo o fator K_1 dado por:

$$K_1 = \frac{2L_{eq}f_s}{R_0}$$

Equação 18

No qual:

f_s - Frequência de chaveamento.

De posse das expressões necessárias ao dimensionamento dos componentes do SEPIC PFP, podemos determinar os valores considerando algumas especificações de projeto listadas a seguir:

- Tensão de entrada (V_{in}) 127 V_{RMS};
- Frequência da rede 60 Hz;
- Potência de saída (P_o) 32 W (Lâmpada 32 W);
- Frequência de chaveamento (f_s) 35 kHz;
- Razão cíclica D escolhida 0,3 ($D_{max} = 0,87$);
- Tensão de saída 300 V;
- Ondulação máxima de corrente na entrada ($\Delta I_{in med}$) 20 %;
- Ondulação máxima de tensão na saída (ΔV_o) 5%;
- Rendimento suposto ideal (100%).

A tabela a seguir mostra os valores dos componentes projetados.

Tabela 1. Valores dos componentes para o conversor SEPIC PFP.

Componente	Valor projetado
L_E	10,85 mH
L_M	692,4 μ H
C_1	453,0 nF
C_o	29,6 μ F

Fonte: Autoria própria.

2.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR SEPIC

Com os valores dos componentes do conversor dimensionados, foi realizada a simulação no *software* PSIM[®]. O circuito simulado é mostrado na Figura 5 e os parâmetros listados anteriormente como tensão, frequência de chaveamento e razão cíclica, também são utilizados.

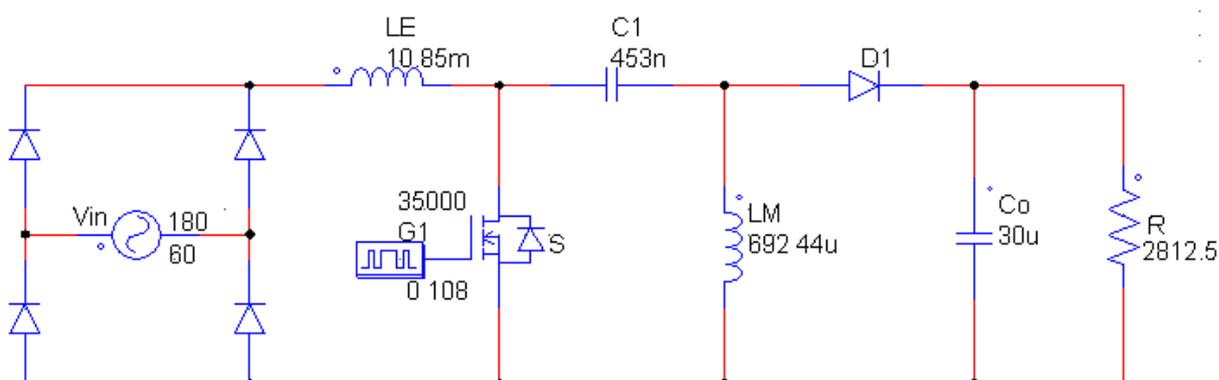


Figura 5. Circuito do Conversor SEPIC simulado no *software* PSIM[®].

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6, a seguir, temos a tensão (curva em vermelho) e corrente (curva em azul) de entrada do conversor (a corrente foi multiplicada 100 vezes para melhorar a visualização).

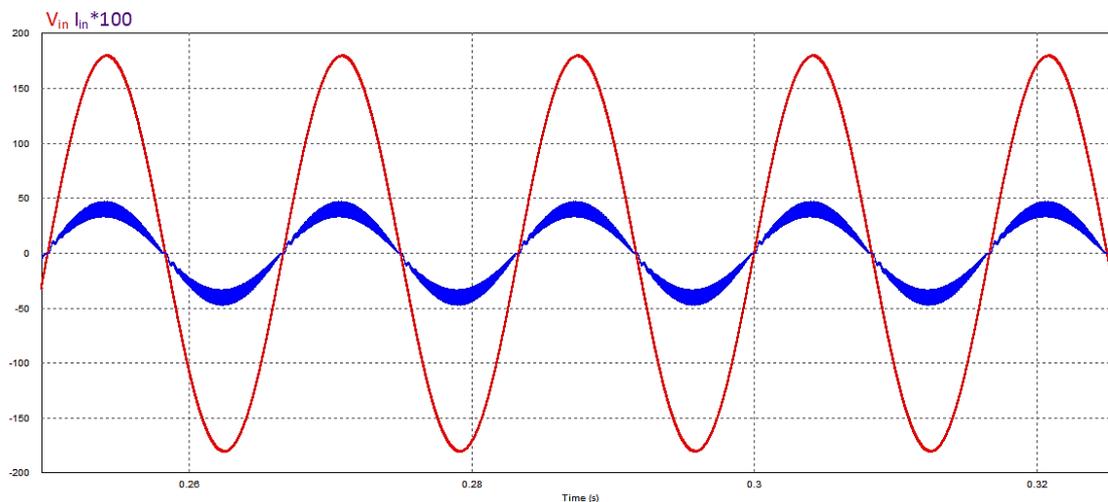


Figura 6. Tensão e corrente de entrada do conversor SEPIC PFP.
Fonte: Autoria própria.

Pela simulação tem-se um FP relativamente alto de 0,989, atendendo a especificação da portaria 267/2009 do MDIC, que é de 0,92. As curvas estão praticamente em fase, e a corrente apresenta certa distorção devido ao capacitor C1 não ter se descarregado totalmente quando a mesma passa por zero. Ainda, a corrente de entrada possui uma componente pulsada que se sobrepõe a outra componente, que por sua vez, segue a forma de onda da tensão da rede.

A Figura 7 mostra o espectro da corrente de entrada a partir do primeiro harmônico (60 Hz) até o quadragésimo (2.400 Hz).

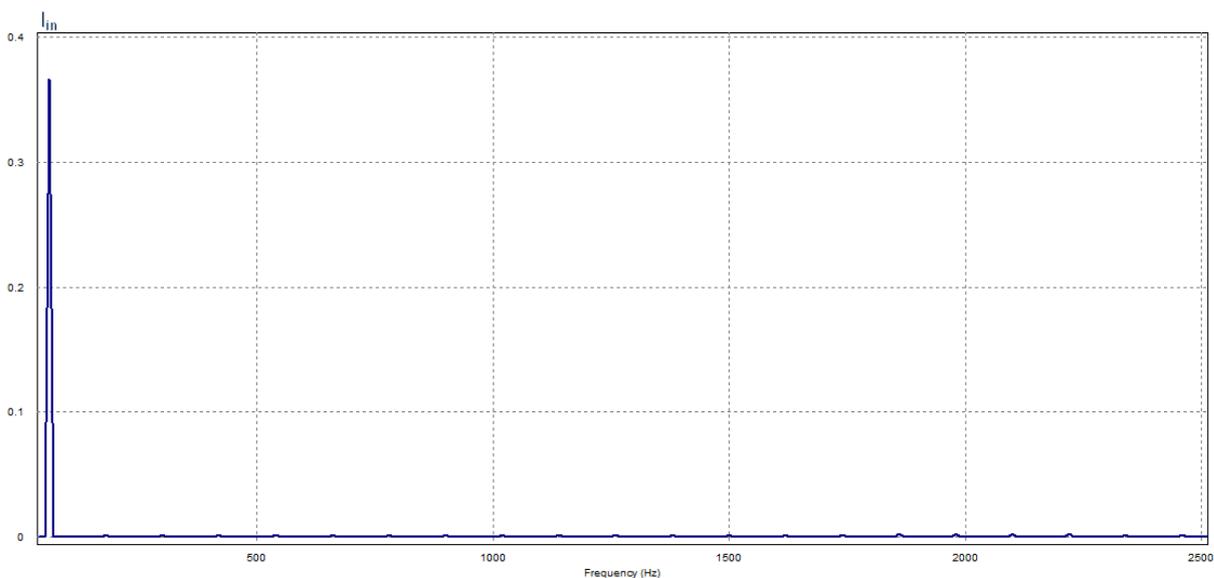


Figura 7. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (1° ao 40° harmônico e amplitude em amperes).
Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 mostra o espectro da corrente de entrada, a partir do terceiro harmônico (180 Hz), até o trigésimo nono (2340 Hz).

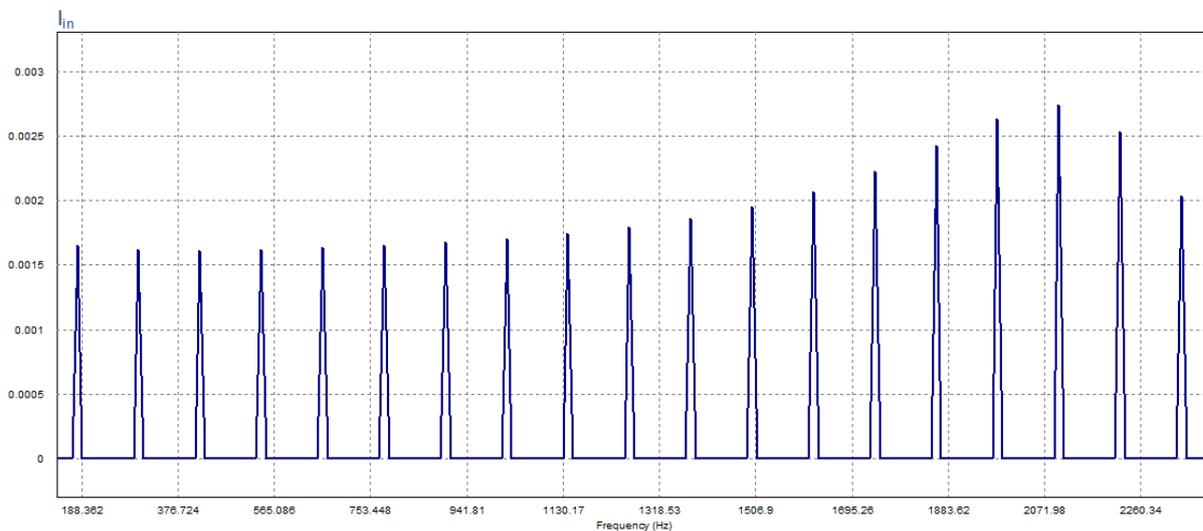


Figura 8. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (3° ao 39° harmônico e amplitude em ampères).
Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 7 e 8, pode-se notar somente a presença de harmônicos ímpares, que são característicos de um PFP com corrente de entrada simétrica.

A seguir temos a tensão de saída do conversor.

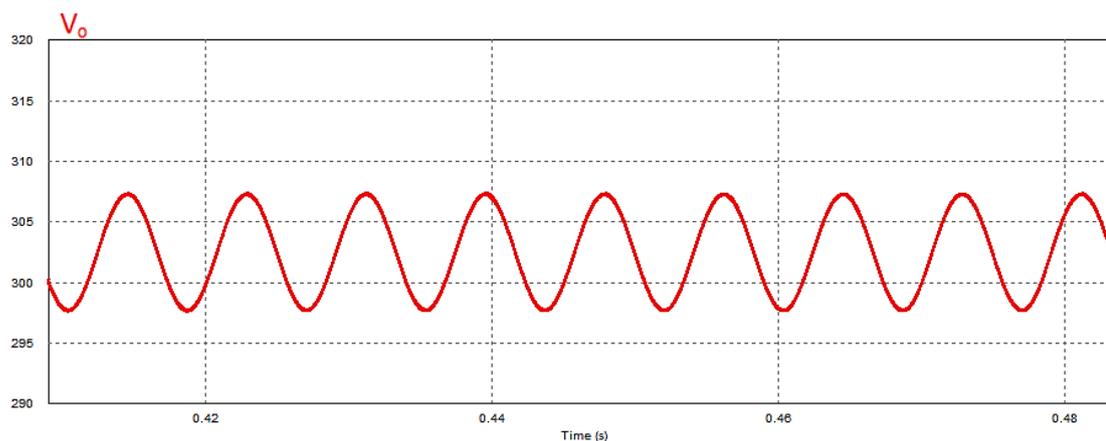


Figura 9. Tensão de saída do conversor SEPIC PFP.
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar na Figura 9 que a tensão média na saída ficou em 302,7 V e com uma ondulação. A máxima tensão apresenta um valor de 307,3 V e a

mínima de 297,7 V, com a ondulação representando 3,2 % da tensão de saída estipulada no projeto (300 V).

A Figura 10, a seguir, mostra a corrente de entrada na partida do conversor.

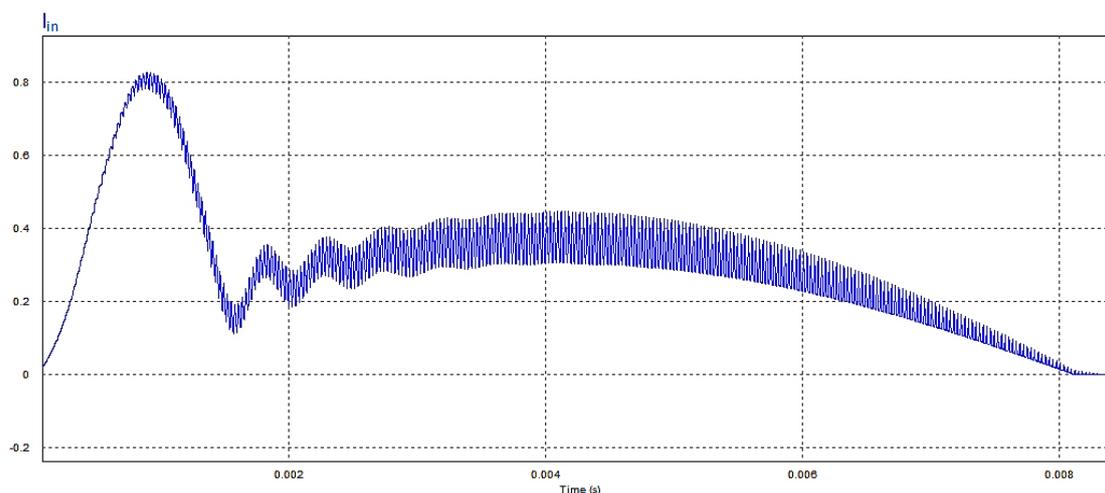


Figura 10. Corrente de entrada na partida do conversor.
Fonte: Autoria própria.

O pico de corrente na entrada alcançou um valor pouco maior do que 0,8 A. Esse valor moderado é possível de se obter em conversores como o SEPIC e Cuk devido a posição do capacitor C_1 (POMÍLIO, 2014).

No conversor SEPIC operando em MCD, a corrente que circula pelo diodo D e pela chave S, dada pela soma das correntes em L_E e L_M , observa-se a característica de descontinuidade de corrente. A Figura 11 mostra a corrente pelo diodo D (curva em vermelho) e pela chave S (curva em azul), na qual vemos a descontinuidade de condução.

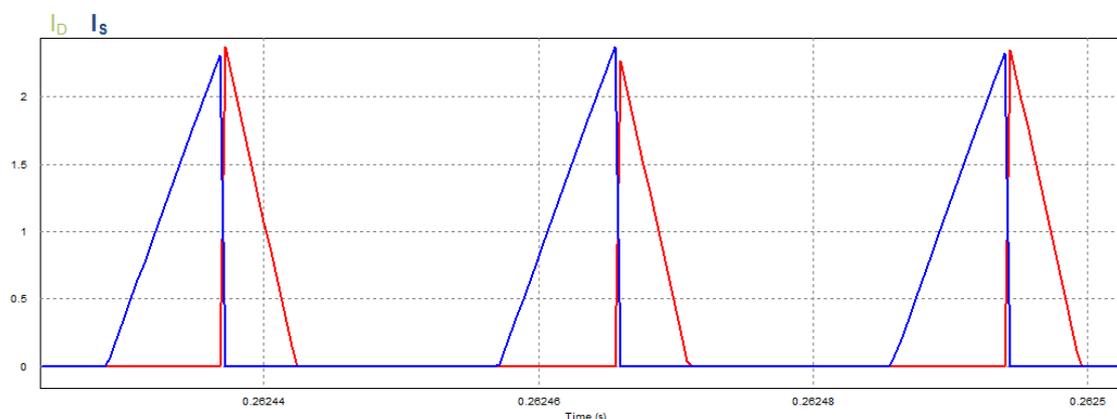


Figura 11. Esforços de corrente pelo diodo D e pela chave S.
Fonte: Autoria própria.

A corrente vista na Figura 11, com amplitude de 2,4 A, é correspondente ao pico de tensão retificada na entrada (aproximadamente 180 V).

Outro parâmetro importante a ser observado é o esforço de tensão na chave (curva em azul) e no diodo (curva em vermelho) do conversor SEPIC, mostrado na Figura 12, a seguir.

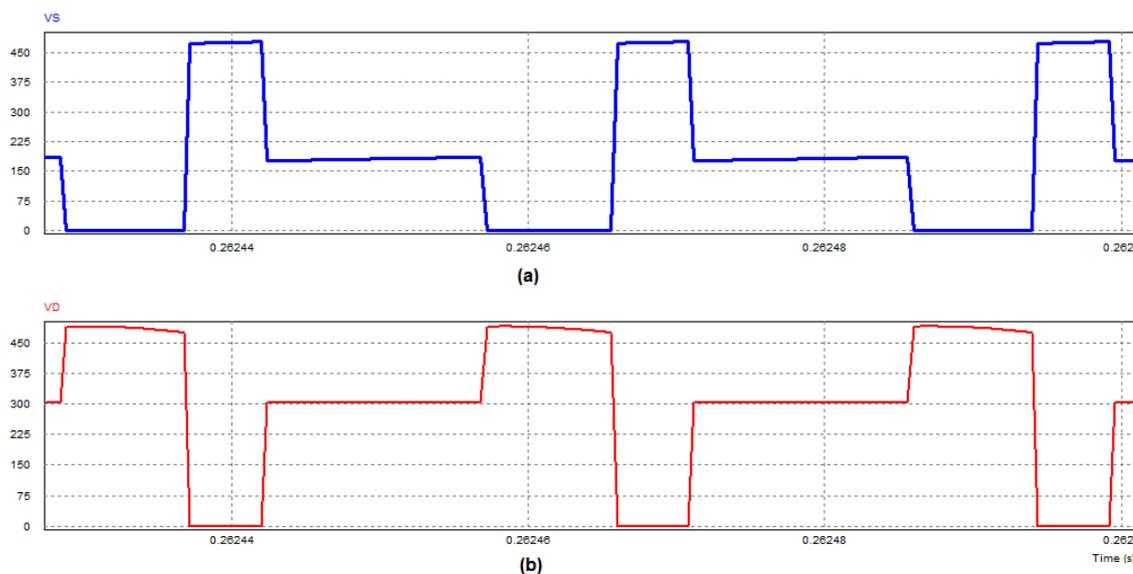


Figura 12. Esforços de tensão em: (a) chave S e (b) diodo D.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12 vemos que o esforço de tensão sobre a chave, hora é a soma da tensão de pico retificada (180 V) e da tensão de saída (300 V), totalizando 480 V, e hora, somente a tensão de entrada retificada. No diodo, temos a soma da tensão de entrada retificada e da tensão de saída na maior amplitude, e na menor, somente a tensão de saída.

2.2.1 Análise dos resultados

Através da simulação do conversor SEPIC PFP foram encontrados os valores de tensão, corrente, potência e fator de potência. A Tabela 2 mostra os valores de projeto, bem como os simulados.

Tabela 2. Valores de projeto e simulados para o conversor SEPIC PFP.

Grandeza	Valores de projeto	Valores obtidos em simulação
Tensão média na saída (V_o)	300 V	302,4 V
Tensão máxima na saída ($V_{o\ max}$)	307,5 V	307,4 V
Tensão mínima na saída ($V_{o\ min}$)	292,5 V	297,7 V
Ripple na saída (ΔV_o)	5,0 %	3,2 %
Corrente de entrada (I_{in})	251,9 mA	260,0 mA
Potência na saída (P_o)	32,0 W	32,6 W
Fator de Potência na entrada (FP)	1,0	0,989

Fonte: Autoria própria.

A pequena elevação e variação na tensão de saída não comprometeu significativamente a potência entregue a R_o . O conversor atingiu um desempenho em termos de FP com 0,989, que está acima do exigido pela portaria 267/2009 do MDIC.

Certos problemas podem ser encontrados durante a simulação do conversor SEPIC quanto a distorção na forma de onda da corrente. Segundo Pomílio (2014, pg 10) duas não idealidades são inerentes a qualquer conversor operando como PFP. São elas: o atraso da corrente, quando a mesma passa por zero, devido a limitada taxa de crescimento da corrente enquanto a tensão da entrada é baixa, e a ondulação da corrente de entrada, devido a baixos valores dos indutores dimensionados (POMÍLIO, 2014).

A tensão de saída do conversor SEPIC apresentou um valor médio pouco maior que o especificado no projeto, e com certa ondulação. Pode-se pensar que a ondulação poderia ser diminuída com um valor maior de capacitância de C_o , porém, isso implica em uma elevação da tensão média na saída, e a simulação toma maior tempo para chegar em regime permanente. Na partida, a corrente de entrada apresenta um pico antes de estabilizar. O conversor SEPIC permite uma corrente de partida na entrada relativamente baixa, se comparada a de outros conversores, devido a posição do capacitor de acoplamento C_1 .

A norma IEC 61000-3-2, que se refere a equipamentos elétricos e eletrônicos que possuam até 16 A por fase conectados a baixa tensão alternada da rede pública, de 50 ou 60 Hz, estabelece limite aos harmônicos de corrente injetados

na rede. Equipamentos de iluminação com potência superior a 25 W se enquadram no item C da norma. A norma determina ainda que o terceiro harmônico não deve ultrapassar 30% da amplitude do harmônico fundamental, multiplicado pelo fator de potência. Na Figura 13 é feito uma comparação entre os valores dos harmônicos da corrente de entrada no SEPIC PFP e os valores máximos estabelecidos pela norma.

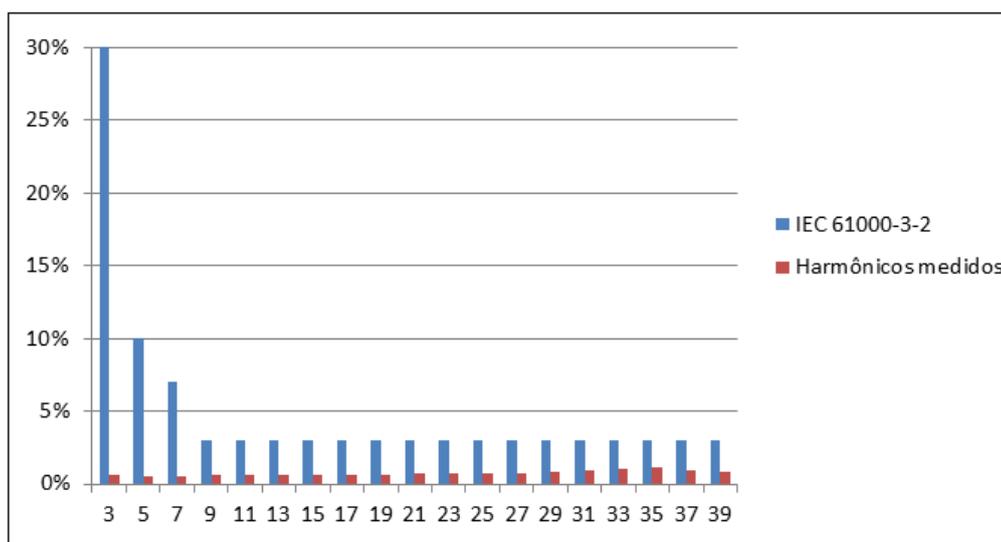


Figura 13. Valores dos harmônicos da corrente de entrada no SEPIC PFP e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2.
Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 13 pode-se notar que os harmônicos injetados na rede elétrica pelo SEPIC PFP projetado, estão dentro dos limites impostos pela norma IEC 61000-3-2.

3. CIRCUITO INVERSOR E FILTRO RESSONANTE

Os inversores são circuitos destinados a converter uma fonte CC em uma fonte CA, ou seja, havendo a necessidade de alimentar uma carga em CA e somente a disponibilidade de uma fonte CC, é aplicado um circuito inversor (HART, 2012). A tensão de saída tem uma forma de onda periódica que, geralmente pode ser considerada senoidal, apesar de nem sempre ser uma senóide perfeita (AHMED, 2000).

Segundo Hammer e Mcgowan (1985), uma senóide não modulada, é a forma de onda ideal para gerar a corrente de arco da lâmpada fluorescente. O acionamento com tensão e correntes senoidais em alta frequência (por exemplo: 20 ou 30 kHz) traz alguns benefícios como: aumento da vida útil, ausência de cintilamento, efeito cataforese eliminado e maior eficiência da lâmpada. Além disso, o Fator de Crista (FC), que é a relação entre a corrente de pico e a eficaz na lâmpada, pode ser melhor avaliado com essa forma de onda. Um FC alto indica uma forma de onda distorcida e elevada corrente de pico, que reflete diretamente sobre os eletrodos e conseqüentemente na vida útil da lâmpada (LOPES, 2010).

O inversor meia ponte com filtro ressonante LCC, mostrado na Figura 10, é uma topologia de uso consolidado em projetos de reatores eletrônicos. Nesse trabalho, também será adotado essa configuração de acionamento. Esse circuito possui 4 etapas de operação que estão detalhadas na Figura 14 e explicadas a seguir.

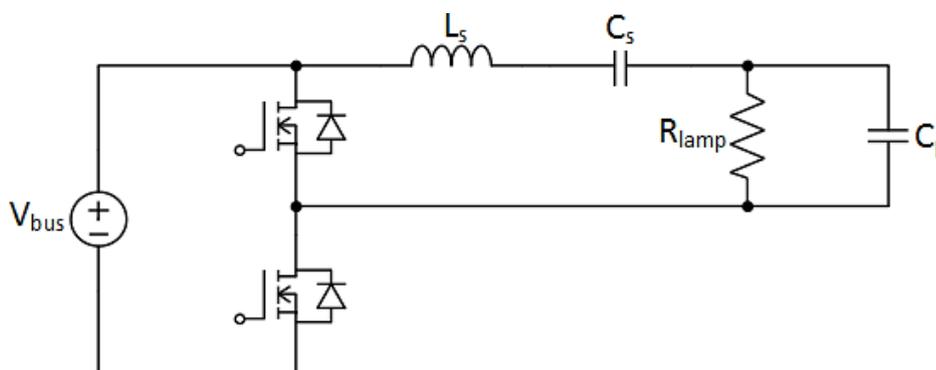


Figura 14. Inversor meia ponte com filtro LCC.
Fonte: Adaptado de Lopes, 2012.

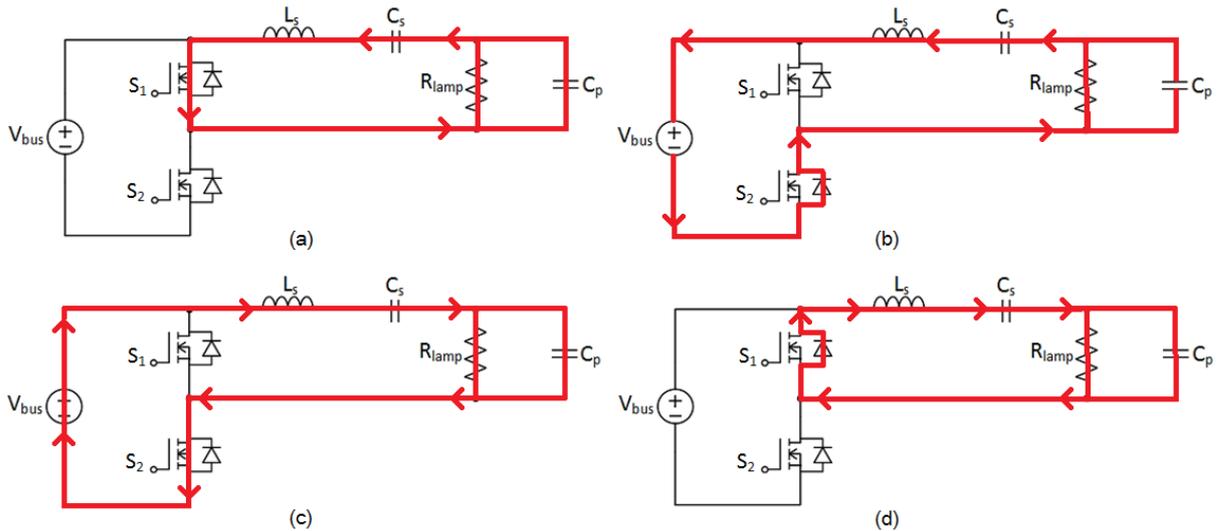


Figura 15. Etapas de operação do inversor e filtro LCC.
Fonte: Adaptado de Santos, 2004.

Etapas de operação:

- (a) Primeira etapa: Nessa etapa, S_1 conduz a corrente correspondente a carga que estava armazenada nos capacitores, invertendo seu sentido.
- (b) Segunda etapa: Quando S_1 entra em corte a corrente assume um caminho alternativo pela fonte e diodo antiparalelo de S_2 .
- (c) Terceira etapa: O diodo antiparalelo ainda conduz quando S_2 é fechada. Dessa forma, S_2 conduz a corrente fornecida pela fonte, e a comutação ocorre com zero de tensão sobre seus terminais.
- (d) Quarta etapa: S_2 entra em corte e a corrente novamente assume um caminho alternativo pelo diodo antiparalelo de S_1 .

3.1 PROJETO DO FILTRO RESSONANTE

O filtro ressonante é responsável pelo correto acionamento da lâmpada, fornecendo as condições de tensão e corrente ideais na partida e em regime permanente. Segundo Bisogno et al. (2002, pg. 6), a melhor escolha de filtro

ressonante é o LC série C paralelo, pois propicia: partida instantânea, comutação suave, ausência de corrente CC na lâmpada, capacitor série de grande valor, capacitor paralelo de pequeno valor. As outras topologias não conseguem reunir todas essas características. A Figura 16 mostra o filtro LCC.

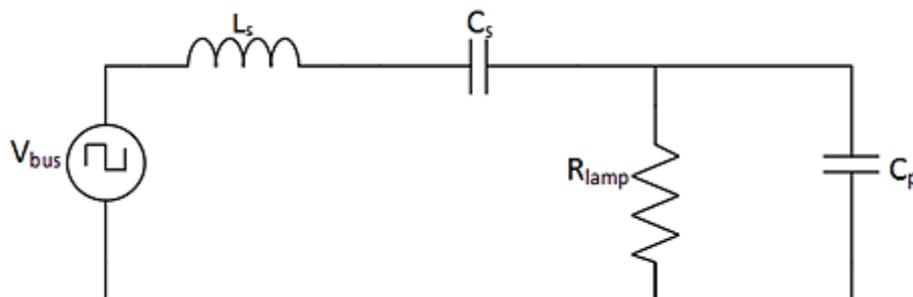


Figura 16. Filtro LCC.
Fonte: Adaptado de Lopes, 2012.

No qual:

V_{bus} - Tensão proveniente do conversor SEPIC PFP;

L_s - Indutor série;

C_s - Capacitor série;

C_p - Capacitor paralelo;

R_{lamp} - Resistência equivalente da lâmpada.

Conforme Lopes (2012, pg. 20), podemos considerar um circuito modificado com uma transformação de impedância tornando-o série, a partir do circuito da Figura 16. A Figura 17 mostra o circuito modificado.

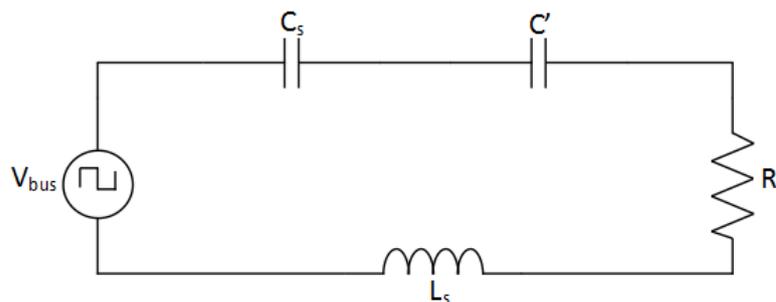


Figura 17. Circuito série modificado do filtro LCC.
Fonte: Adaptado de Lopes, 2012.

Onde:

C' - Capacitor equivalente série;

R' - Resistor equivalente série.

Para o circuito da Figura 16, podemos fazer uma análise entre C_p e R_{lamp} que resulta em:

$$Z_p = \frac{R}{\omega_s^2 C_p^2 R^2 + 1} - \frac{j\omega_s C_p R^2}{\omega_s^2 C_p^2 R^2 + 1}$$

Equação 19

Onde:

Z_p - Impedância paralela entre R_{lamp} e C_p ;

ω_s - Frequência angular de entrada;

Dessa forma, as reatâncias, paralela e equivalente série são:

$$X_p = \frac{1}{\omega_s C_p}$$

Equação 20

$$X_s = \frac{\omega_s C_p R^2}{\omega_s^2 C_p^2 R^2 + 1} = \frac{1}{\omega_s C'}$$

Equação 21

As resistências, paralela e equivalente série são:

$$R_p = R$$

Equação 22

$$R_s = \frac{R}{\omega_s^2 C_p^2 R^2 + 1}$$

Equação 23

Generalizando uma forma de transformação da impedância paralela em série equivalente, consideramos a admitância:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{-jX_p}$$

Equação 24

Manipulando a Equação (24) temos:

$$Z = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + jX_p^2} - j \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + jX_p^2}$$

Equação 25

Sendo a parcela real e imaginária de Z , respectivamente as equivalentes, resistência série e a reatância série, como segue:

$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + jX_p^2}$$

Equação 26

$$X_s = \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + jX_p^2}$$

Equação 27

Dividindo X_s por R_s , temos:

$$\frac{X_s}{R_s} = \frac{R_p}{X_p} = q$$

Equação 28

Fazendo:

$$\frac{X_p}{R_p} = \frac{1}{q}$$

Equação 29

Substituindo a Equação (29) em (26) e (27), resulta em:

$$X_s = \frac{X_p}{\frac{1}{q^2} + 1}$$

Equação 30

$$R_s = \frac{R_p}{q^2 + 1}$$

Equação 31

Da Figura 17, o resistor equivalente R' , que é o mesmo equivalente série em termos gerais R_s , pode agora ser determinado substituindo as Equações (20) e (22) na Equação (31), como segue:

$$R' = \frac{R}{\omega_s^2 C_p^2 R^2 + 1}$$

Equação 32

Substituindo as Equações (20) e (21) em (30) podemos determinar o capacitor equivalente C' :

$$C' = C_p \left(\frac{1}{\omega_s^2 C_p^2 R^2} + 1 \right)$$

Equação 33

Algumas considerações devem ser feitas nessa parte do trabalho, pois são necessárias aos passos seguintes. São elas:

$$C_{eq} = \frac{C_s C'}{C_s + C'}$$

Equação 34

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_s C_{eq}}}$$

Equação 35

$$Q_o = \frac{\omega_o L_s}{R'}$$

Equação 36

$$Q_o = \frac{1}{\omega_o R' C_{eq}}$$

Equação 37

$$A = \frac{\omega_s}{\omega_o}$$

Equação 38

Onde:

ω_o - Frequência angular de ressonância;

A - Relação entre as frequências angulares de entrada e ressonância.

De posse das Equações (32), (33) e (34) é possível obter a impedância equivalente total para o circuito da Figura 17:

$$Z_{eq} = \frac{1}{j\omega_s C_{eq}} + R' + j\omega_s L_s$$

Equação 39

Assim:

$$\omega_s C_{eq} Z_{eq} = -j + j\omega_s^2 L_s C_{eq} + \omega_s C_{eq} R'$$

Equação 40

A potência aparente na entrada do circuito da Figura 17 pode ser expressa por:

$$S = \frac{V_{in}^2 \omega_s C_{eq}}{\omega_s C_{eq} Z_{eq}}$$

Equação 41

Substituindo a Equação (40) em (41) e manipulando, temos:

$$S = \frac{V_{in}^2 \omega_s^2 C_{eq} R'}{(\omega_s C_{eq} R')^2 + (\omega_s^2 L_s C_{eq} - 1)^2} - j \frac{(V_{in}^2 \omega_s^2 C_{eq})(\omega_s^2 L_s C_{eq} - 1)}{(\omega_s C_{eq} R')^2 + (\omega_s^2 L_s C_{eq} - 1)^2}$$

Equação 42

Com as considerações feitas de (34) à (38) e a Equação (42), resulta em:

$$S = \frac{V_{in}^2 \omega_s C_{eq} A^3 Q_o}{A^4 Q_o^2 + A^2(1 - 2Q_o^2) + Q_o^2} - j \frac{(V_{in}^2 \omega_s C_{eq} A^2 Q_o - V_{in}^2 \omega_s C_{eq} A^4 Q_o^2)}{A^4 Q_o^2 + A^2(1 - 2Q_o^2) + Q_o^2}$$

Equação 43

Utilizando somente a potência ativa da Equação (43) podemos escrever:

$$\frac{P}{V_{in}^2} = \frac{\omega_s C_{eq} A^3 Q_o}{A^4 Q_o^2 + A^2(1 - 2Q_o^2) + Q_o^2}$$

Equação 44

Substituindo (38) e depois (37) na Equação (44) obtemos:

$$\frac{PR'}{V_{in}^2} = \frac{A^2}{A^4 Q_o^2 + A^2(1 - 2Q_o^2) + Q_o^2}$$

Equação 45

Assim, um fator K pode ser determinado, sendo o coeficiente de transferência de potência, como segue:

$$\frac{PR'}{V_{in}^2} = \frac{A^2}{A^4 Q_o^2 + A^2(1 - 2Q_o^2) + Q_o^2} = K$$

Equação 46

Dessa forma, um polinômio de quarto grau pode ser determinado a partir da Equação (46), no qual encontramos valores de A que são úteis para determinar os componentes L_s e C_s :

$$A^4 Q_o^2 + A^2 \left(1 - 2Q_o^2 - \frac{1}{K}\right) + Q_o^2 = 0$$

Equação 47

Seidel et al. (2011, pg. 2), apresentam um método de dimensionamento do capacitor paralelo que leva em consideração o aquecimento dos eletrodos, para facilitar a partida da lâmpada, e a corrente que passa pelo capacitor C_p . Trata-se do método SoS (*Sum of the Squared lead wire currents*), no qual a corrente de descarga I_D deve obedecer aos limites máximos e mínimos estabelecidos pelo fabricante da lâmpada fluorescente. A corrente I_{LL} que circula por C_p e I_{LH} que é a total do filtro, possuem valores máximos, porém sem valores mínimos especificados. Então, os seus valores devem obedecer a seguinte expressão:

$$SoS = I_{LH}^2 + I_{LL}^2; \quad I_{LH} > I_{LL}$$

Equação 48

A Figura 18 mostra o filtro LCC com as correntes I_D , I_{LH} e I_{LL} no detalhe da lâmpada fluorescente.

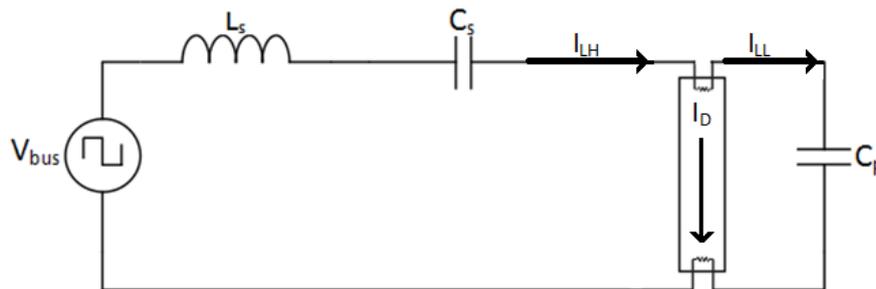


Figura 18. Filtro LCC com o detalhe de I_{LH} , I_D e I_{LL} .
Fonte: Adaptado de Seidel et al., 2011.

Conforme Seidel et al. (2011, pg. 4), o capacitor paralelo pode ser dimensionado por:

$$C_p = \frac{I_{LL}}{V_{lamp} 2\pi f_s}$$

Equação 49

Onde:

V_{lamp} - Tensão na lâmpada;

f_s - Frequência de comutação.

O capacitor C_p pode ainda ser calculado conforme a faixa aceitável de variação de tensão na lâmpada ($\pm 10\%$) em regime permanente fazendo V_{lamp} 10% para mais ou para menos, e dessa forma, escolher um valor de C_p mínimo e máximo respeitando o valor adequado de I_{LL} . (LOPES et al., 2012).

Com todas as expressões determinadas podemos dimensionar os componentes do filtro, e para isso, alguns parâmetros de projeto devem ser levados em conta:

- Tensão de entrada (saída do estágio PFC V_{bus}) 300 V;
- Frequência de chaveamento (f_s) 35 kHz;
- Potência de saída (P_o) 32 W (Lâmpada de 32 W);
- Fator de qualidade (Q_o) 1,5;
- Tensão eficaz na lâmpada (V_{lamp}) 109 V;
- Corrente nominal da lâmpada (I_D) 290 mA;
- Corrente no capacitor paralelo (I_{LL}) 145 mA;
- Resistência equivalente da lâmpada (R_{lamp}) 376,12 Ω ;

A frequência de comutação de 35 kHz foi escolhida segundo Hammer e McGowan (HAMER, MCGOWAN, 1985), que afirmam haver uma melhora significativa da eficiência da lâmpada operando em alta frequência.

A resistência equivalente da lâmpada em regime permanente foi determinada conforme Cervi et al. (CERVI et al., 2002), no qual nos dá uma expressão para o cálculo da resistência em função da potência, conforme segue:

$$R(P) = 4013e^{-0,074 \cdot P} + 9447e^{-0,332 \cdot P}$$

Equação 50

Os valores nominais de corrente e tensão da lâmpada foram calculados fazendo-se uso da potência nominal (32 W) e da resistência equivalente (376,12 Ω) dada pela equação 50. Consultando um *datasheet*, como por exemplo, da lâmpada fluorescente *Lumilux ES T8* da Osram, no qual indica, para um reator de referência em 50 Hz e 25 °C (conforme IEC 60081), traz uma corrente de 440 mA e tensão de

90 V, nominais. Ainda, para a mesma lâmpada operando com um reator eletrônico Osram ECG (*Electronic Control Gear*), o conjunto apresenta corrente nominal de 160 mA (OSRAM, 2013). Contudo, os valores calculados para a corrente e tensão neste trabalho (109 V e 290 mA), podem ser considerados coerentes conforme Lopes et al. (LOPES et al., 2012) que faz uso de uma lâmpada T8 de 32 W.

A Tabela 3 mostra os valores calculados dos componentes do filtro LCC.

Tabela 3. Valores dos componentes projetados do filtro LCC.

Componente	Valor projetado
L_s	2,78 mH
C_s	26,17 nF
C_p	6,2 nF

Fonte: Autoria própria.

3.2 SIMULAÇÃO DO INVERSOR E DO FILTRO RESSONANTE

Com os valores dos componentes do filtro LCC dimensionados é possível realizar a simulação. O circuito simulado no *software* PSIM[®] é mostrado na Figura 19, possuindo os pré-requisitos de projeto listados anteriormente.

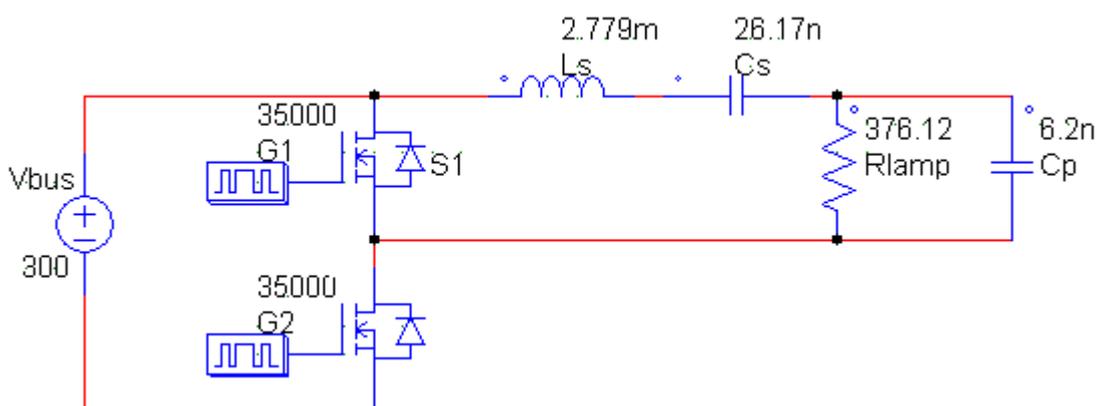


Figura 19. Circuito simulado no *software* PSIM[®].

Fonte: Autoria própria.

A seguir, temos a tensão (curva em vermelho) e corrente na lâmpada fluorescente em regime permanente (a corrente, curva em azul, está multiplicada 100 vezes para melhor visualização).

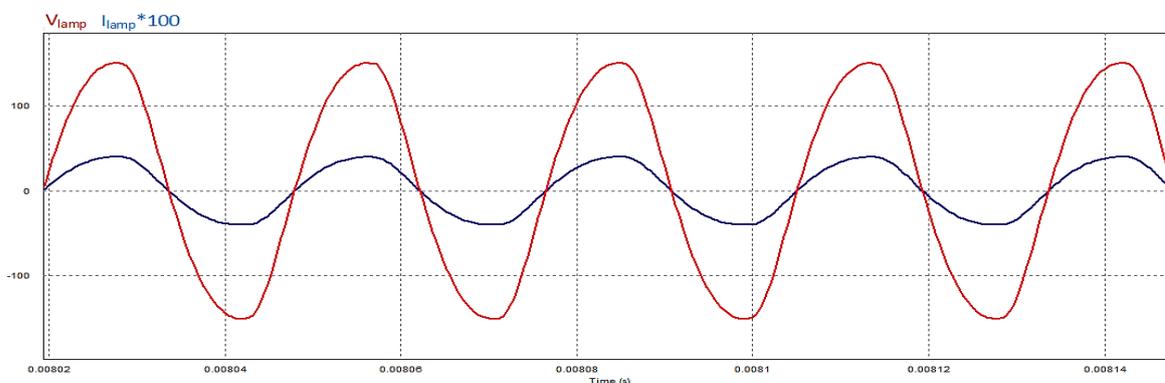


Figura 20. Tensão e corrente na lâmpada fluorescente.

Fonte: Autoria própria.

A tensão e corrente na lâmpada apresentam uma forma de onda um pouco distorcida, que sugere a presença de componentes harmônicas sobrepostas a fundamental. Para a corrente na lâmpada obteve-se um FC de 1,52, sendo que para uma senóide perfeita é de 1,41. O máximo FC permitido pela norma ANSI C82.11 é de 1,7, mas esse valor é baseado na operação em 60 Hz, de um reator de referência. Assim, segundo Kaiser (1989), em alta frequência podem ser considerados aceitáveis valores de FC maiores.

A tensão de partida da lâmpada pode ser avaliada com uma resistência equivalente maior do que em regime permanente. A seguir temos a simulação da tensão de ignição da lâmpada com uma resistência equivalente de partida cem vezes maior que a de regime permanente.

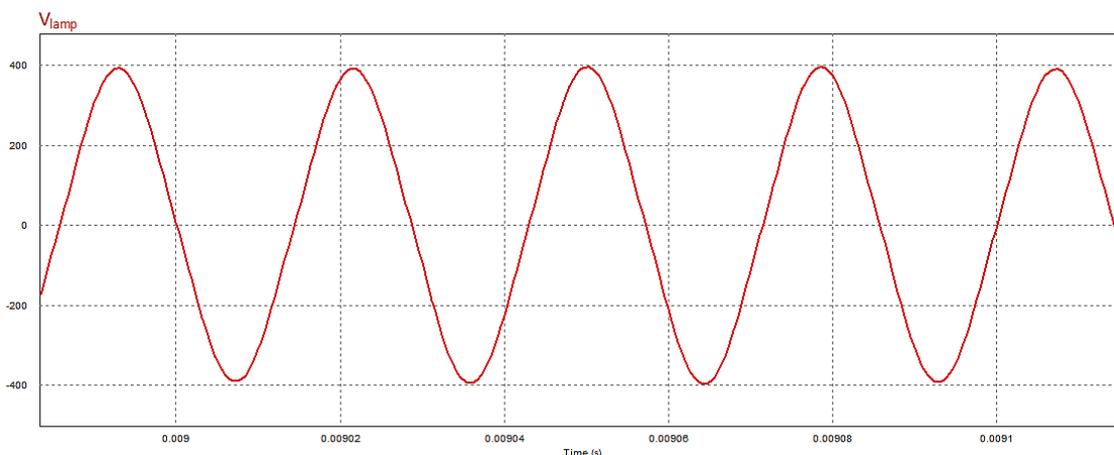


Figura 21. Tensão de ignição na lâmpada fluorescente.
Fonte: Autoria própria.

Em uma situação real de implementação, teríamos presentes muitas componentes harmônicas na tensão de partida, mas, a Figura 21 nos dá uma estimativa da magnitude da tensão que o filtro LCC impõe na lâmpada no momento da ignição.

Outro ponto interessante a ser observado é a condição de ZVS (do inglês: *Zero Voltage Switching*), na qual é garantida a comutação com zero de tensão caso a corrente de entrada do filtro esteja defasada em relação à tensão. Esse fato aponta um filtro com característica indutiva. A Figura 22 mostra a corrente (curva em azul, multiplicada 200 vezes) e tensão (curva em vermelho) de entrada do filtro LCC.

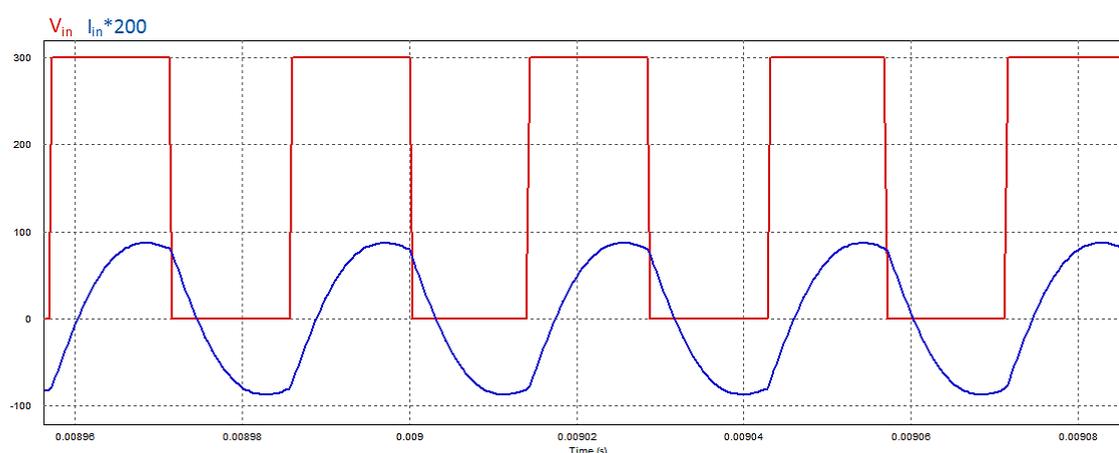


Figura 22. Corrente e tensão de entrada do filtro LCC.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22 pode-se notar a corrente defasada em relação à tensão, e a comutação ZVS se dá quando a corrente passa pelo diodo antiparalelo a chave,

cada qual comutando em sua determinada etapa. A figura a seguir mostra a corrente (curva em azul, multiplicada 200 vezes) e a tensão (curva em vermelho) nas chaves S1 e S2.

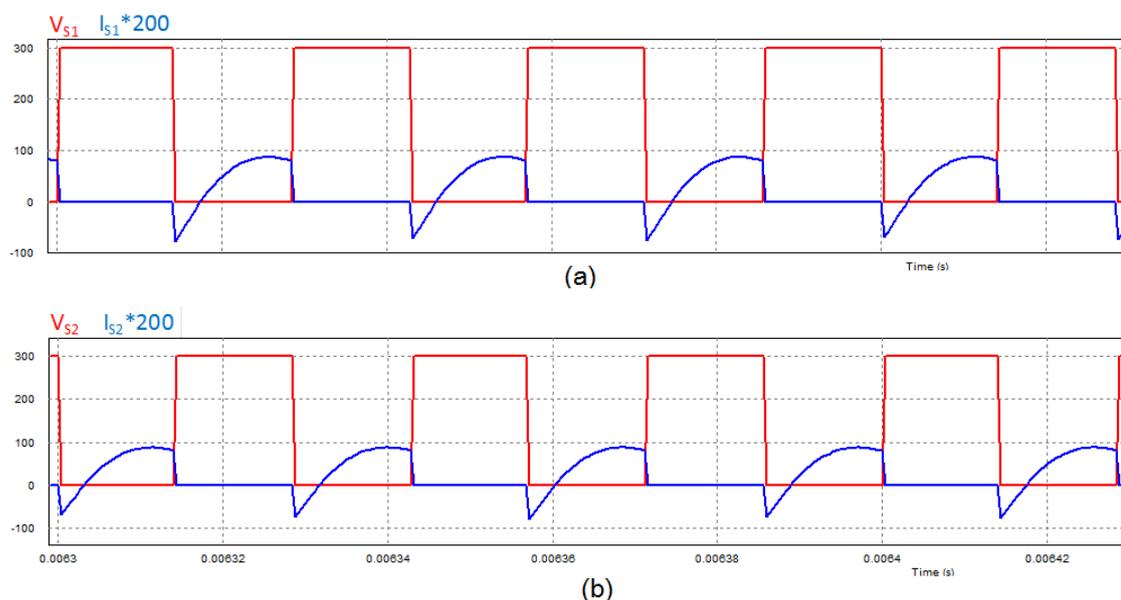


Figura 23. Esforços nos semicondutores: (a) Corrente e tensão na chave S1 e (b) Corrente e tensão na chave S2.

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 23 podemos visualizar a corrente e tensão nas chaves do inversor. A corrente pela chave apresenta um valor positivo máximo de 431 mA, e um valor máximo negativo de 351 mA, sendo este último, a corrente pelo diodo antiparalelo. Quando a chave está aberta a tensão é máxima e a corrente é nula. No momento em que a chave entra em condução a corrente que passa pela mesma é negativa, ou seja, circula pelo diodo antiparalelo. Pelo fato de o diodo ainda estar conduzindo quando a chave é fechada, a tensão sobre a mesma é zero.

3.2.1 Análise dos resultados

Neste item vamos comparar os valores obtidos em simulação da potência, da tensão e da corrente, com os valores de projeto. Na Tabela 4, temos os resultados encontrados para o filtro LCC em regime permanente.

Tabela 4. Valores especificados ou calculados e de simulação para o filtro LCC.

Grandeza	Valores de projeto	Valores de simulação
Tensão na lâmpada (V_{lamp})	109,0 V	109,5 V
Corrente de descarga (I_D)	290,0 mA	291,2 mA
Corrente em C_p (I_{LL})	145,0 mA	151,3 mA
Potência na lâmpada (P_o)	32,0 W	31,9 W

Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 4 podemos ver que a corrente em C_p ficou um pouco acima do valor de projeto (4,3 %). A corrente I_{LL} pode ser compensada diminuindo o valor do capacitor C_p e recalculando os componentes L_s e C_s que estão em função do mesmo.

A seguir temos uma tabela com os valores de tensão e corrente no filtro com a suposição de que a resistência equivalente da lâmpada na partida é de cem vezes maiores que em regime permanente.

Tabela 5. Tensão e corrente do filtro na partida da lâmpada.

Grandeza	Valores simulados
Tensão RMS na lâmpada ($V_{lamp\ RMS}$)	285,7 V
Tensão de pico na lâmpada ($V_{lamp\ pico}$)	400,0 V
Corrente de descarga RMS (I_D)	7,54 mA
Corrente RMS em C_p (I_{LL})	350,0 mA

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5 observa-se a magnitude da tensão e corrente que difere dos valores em regime permanente. A elevação da tensão sobre R_{lamp} é proporcionada pela característica de alto ganho na partida do filtro LCC. A corrente I_{LL} que passa por C_p e filamentos da lâmpada e que promove o aquecimento dos mesmos, possui um valor mais elevado.

A tensão na lâmpada e corrente de descarga, em regime permanente, apresentaram valores simulados próximos dos calculados. A tensão e a corrente de entrada do filtro estão defasadas e indica a possibilidade de comutação suave das chaves. A corrente do capacitor C_p apresentou um valor pouco maior que o

especificado no projeto. Podemos diminuir a corrente I_{LL} colocando um valor menor para C_p , porém, deve ser feito com cautela, pois devem ser recalculados L_s C_s , que causa certa dificuldade de encontrar um valor comercial para os mesmos.

O filtro LCC apresenta ganho elevado na tensão de partida da lâmpada. Isso ocorre quando a resistência da lâmpada é maior e o pico da frequência de ressonância move-se para frequências maiores, então, a característica do circuito passa de um filtro ressonante LC série para um filtro ressonante LC paralelo (SANTOS, 2004).

4. DIMERIZAÇÃO DO REATOR E MODELO DA LÂMPADA

Nesta etapa do trabalho é realizada uma simulação do inversor e filtro ressonante com a sua tensão de entrada CC. Ainda, a resistência de carga $R_{l\text{amp}}$ usada anteriormente é substituída por um modelo da lâmpada fluorescente implementado no *software* OrCAD®, visando observar-se o comportamento do reator com uma maior proximidade de uma situação real.

Um circuito de seleção de razão cíclica que comanda o conversor SEPIC é proposto nesse item. Através do comando do conversor é possível variar a tensão de barramento, e assim, ser realizada a dimerização na lâmpada.

4.1 SIMULAÇÃO COM O MODELO DA LÂMPADA

Para avaliar o desempenho do inversor e filtro ressonante, temos de simular os mesmos com o modelo da lâmpada, que representa as suas características dinâmicas na partida e em regime permanente.

O modelo foi implementado no *software* OrCAD® com a Equação 50, conforme Cervi et al. (CERVI et al., 2002). A Figura 24 mostra o circuito do inversor, filtro ressonante e o modelo da lâmpada.

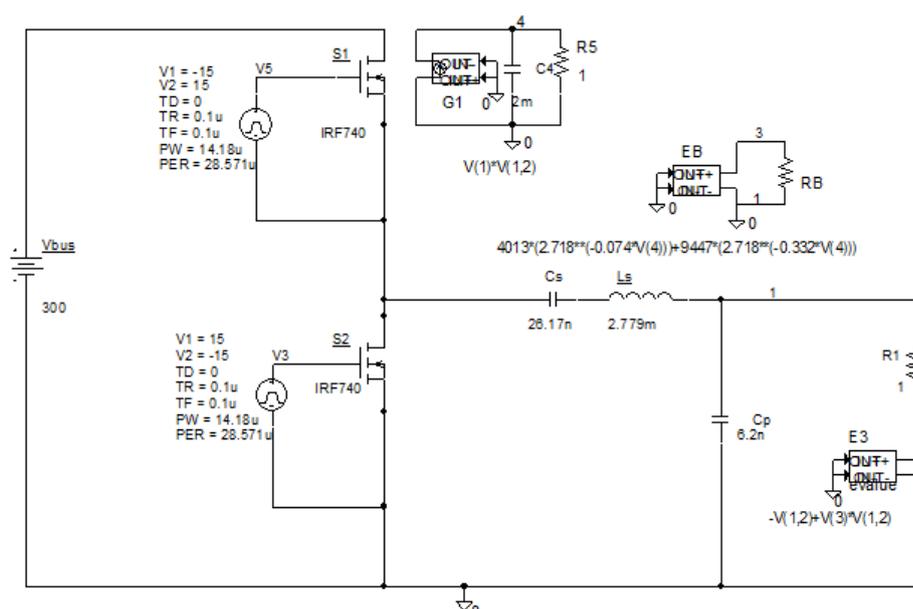


Figura 24. Circuito do inversor, filtro ressonante e modelo da lâmpada.

Fonte: Autoria própria.

A simulação foi realizada com uma fonte CC representando a tensão de saída do conversor SEPIC, visando avaliar a variação de tensão, corrente e potência sobre o modelo da lâmpada. As Figuras 25, 26 e 27 mostram a tensão, corrente e potência na lâmpada para a tensão de entrada CC de 300 V.

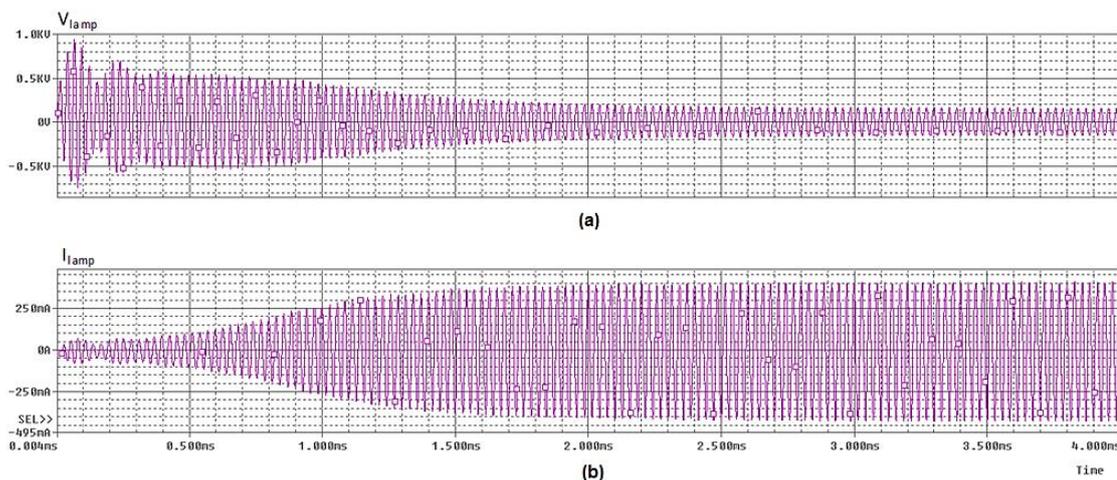


Figura 25. (a) Tensão, e (b), corrente na lâmpada nos instantes iniciais de simulação (tensão de entrada de 300 V).

Fonte: Autoria própria.

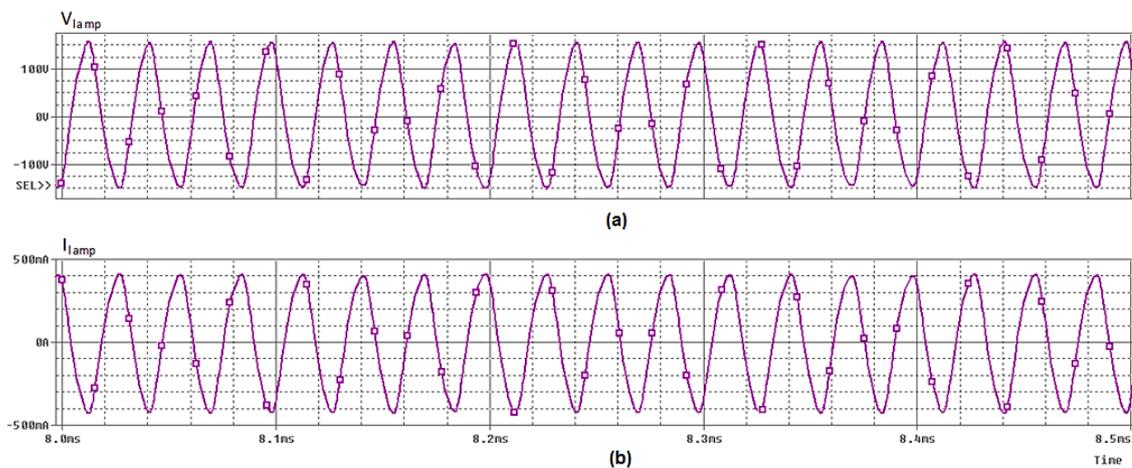


Figura 26. (a) Tensão, e (b), corrente na lâmpada em regime permanente (tensão de entrada de 300 V).

Fonte: Autoria própria.

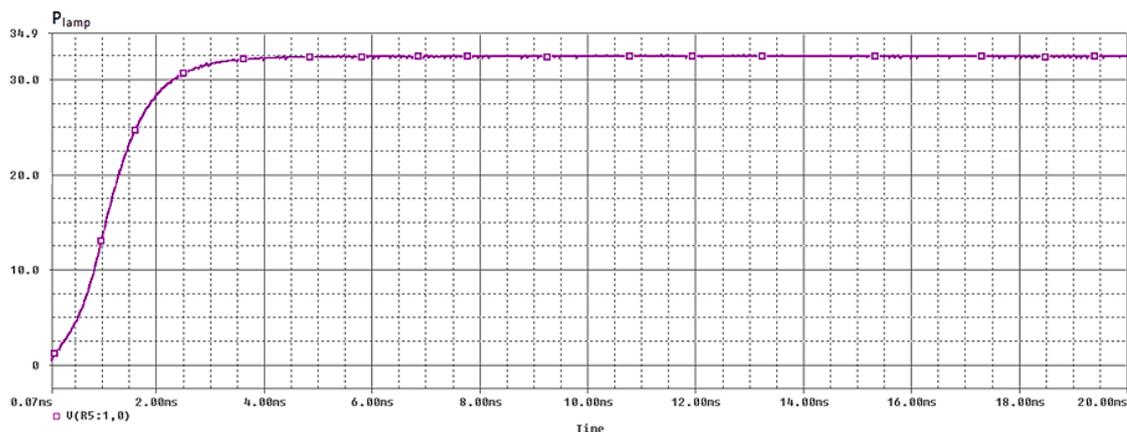


Figura 27. Potência na lâmpada (em watts) (tensão de entrada de 300 V).
Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 27, observa-se uma potência de 32 W, para uma tensão de barramento de 300 V, em regime permanente.

Para avaliar a diminuição da potência na lâmpada em termos da tensão de barramento, a simulação foi realizada com vários valores entre 300 V e 150 V. O valor de 150 V na entrada do filtro se mostrou coincidente com a potência mínima de 12 W na lâmpada conforme mostrado no trabalho de Lopes et al. (LOPES et al., 2010). Esta faixa de potência (32 à 12 W), evita o inconveniente da diminuição excessiva da corrente de arco e elimina o risco da lâmpada se desligar. As Figuras 28, 29 e 30 mostram a tensão, corrente e potência na lâmpada para a tensão de entrada CC no inversor de 150 V.

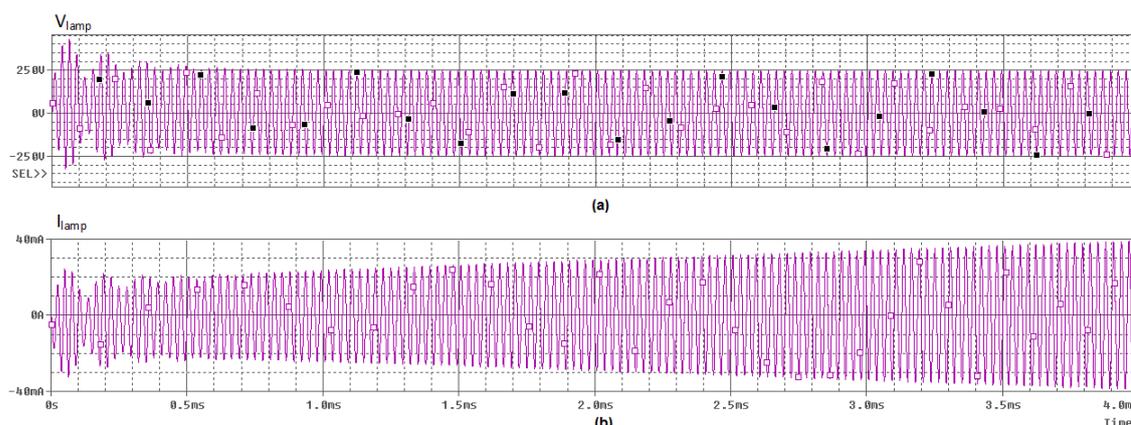


Figura 28. (a) Tensão, e (b), corrente na lâmpada nos instantes iniciais de simulação (tensão de entrada de 150 V).
Fonte: Autoria própria.

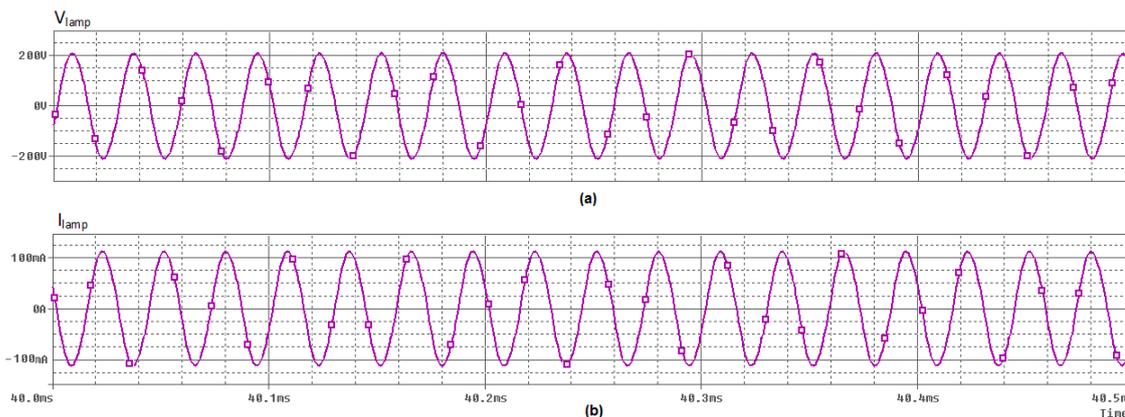


Figura 29. (a) Tensão, e (b), corrente na lâmpada em regime permanente (tensão de entrada de 150 V).
Fonte: Autoria própria.

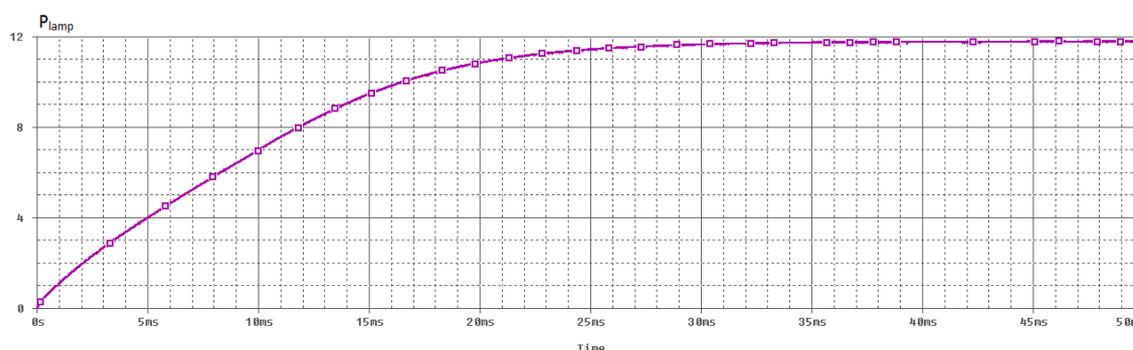


Figura 30. Potência na lâmpada (em watts) (tensão de entrada de 150 V).
Fonte: Autoria própria.

Com a tensão de barramento de 150 V obteve-se uma potência de aproximadamente 12 W, em regime permanente, como pode ser visto na Figura 30.

Através dessas simulações podemos visualizar a variação de tensão, corrente e potência sobre a lâmpada, representada pelo modelo da Equação 50. Contudo, os circuitos simulados e os resultados encontrados, são similares aos de um reator eletrônico com tensão fixa na entrada do estágio do inversor. Cabe agora incorporar o conversor SEPIC comandado por um circuito auxiliar de controle de razão cíclica.

4.2 CIRCUITO DE SELEÇÃO DE RAZÃO CÍCLICA

Para possibilitar a dimerização automática na lâmpada fluorescente, é necessário um circuito auxiliar de seleção de razão cíclica. Para esse propósito, pode-se usar um LDR como sensor da intensidade luminosa do ambiente. Esse

elemento varia sua resistência conforme a incidência de luz sobre o mesmo. Assim, quando combinado a alguns componentes e uma fonte CC, permite obter um sinal de tensão analógico útil ao controle de razão cíclica do conversor SEPIC. O Gráfico 2, a seguir, mostra a variação da resistência de um LDR (em ohms) em função da iluminância média (em lux).

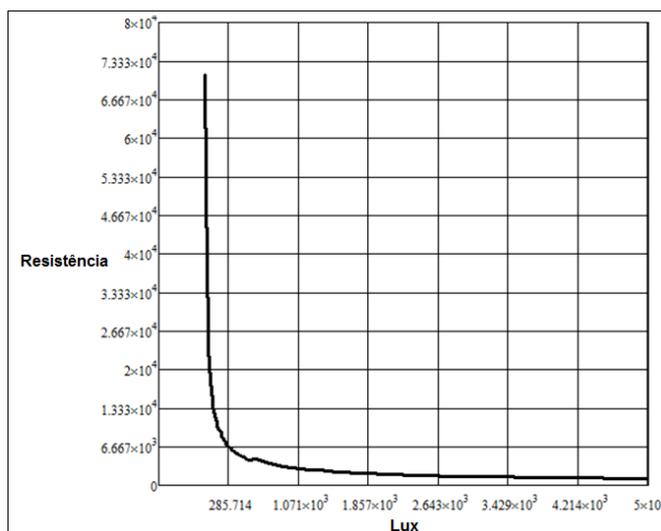


Gráfico 2. Variação da resistência de um LDR em função da iluminância média.

Fonte: Adaptado de Lopes et al., 2010.

Com auxílio do *software* OrCAD[®] é possível simular a variação de um resistor dinamicamente, no caso o LDR, com a função *Param/Special*, na qual é feito um parâmetro de varredura (*Parametric Sweep*) em toda a faixa de variação da resistência do LDR, que vai de 1,1 kΩ, até 71 kΩ, para os valores respectivos de iluminância média de 5.000 á 20 lux. Assim, fazendo um divisor de tensão resistivo, e usando diodos zeners para limitar uma faixa de tensão, como mostrado na Figura 31, obtém-se um sinal de tensão analógico conforme é variada a resistência do LDR.

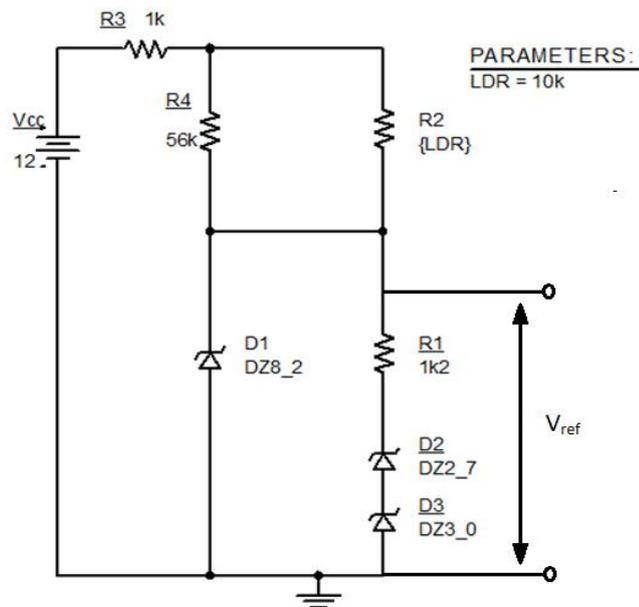


Figura 31. *Parametric sweep* com o LDR.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 mostra a tensão analógica (em volts) obtida em função da resistência do LDR (em quilo-ohms).

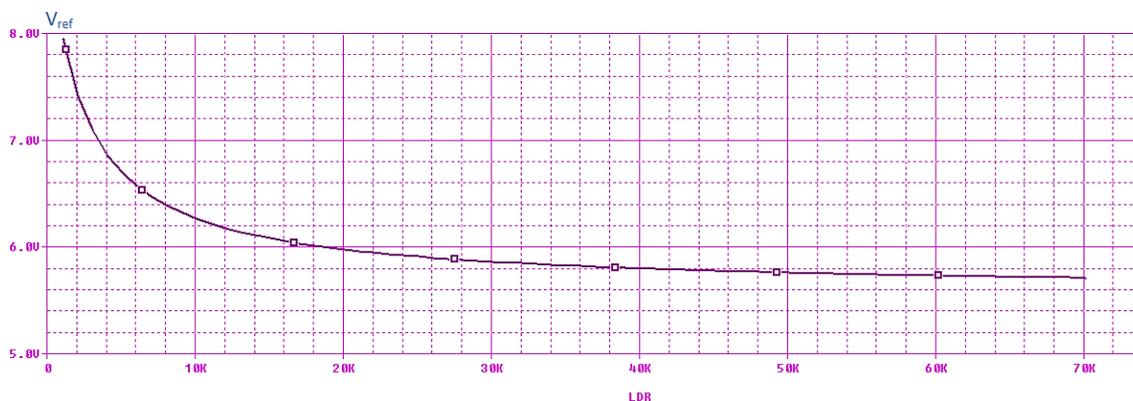


Figura 32. Tensão analógica obtida em função da resistência do LDR.
Fonte: Autoria própria.

Para o circuito de seleção de razão cíclica do conversor SEPIC optou-se pelo uso de uma topologia usando amplificadores operacionais (Ampops). Circuitos de característica de tensão de entrada e saída analógicas, são de fácil implementação com o uso de amplificadores operacionais. Um circuito gerador de Modulação de Largura por Pulso (PWM) pode ser feito com o uso de três ampops como segue.

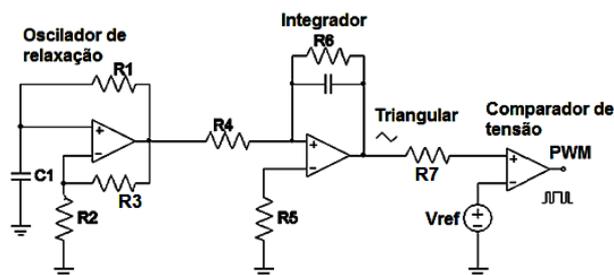


Figura 33. Circuito de seleção de razão cíclica.

Fonte: Adaptado de Pertence, 2003.

Na Figura 33 temos um oscilador de relaxação, um integrador e um comparador de tensão. Ainda na Figura 33, V_{ref} representa a tensão analógica de referência proporcionada pelo circuito da Figura 31. A tensão analógica de entrada é comparada com uma onda triangular, e assim, gerada a PWM. Através da tensão analógica de entrada V_{ref} , a PWM pode ser variada, e então, comandando a chave S1 do conversor SEPIC. Dessa forma, a tensão de saída do conversor é controlada.

Na Figura 34 temos o reator eletrônico completo, com o circuito de seleção de razão cíclica, conversor SEPIC PFP, inversor e filtro ressonante.

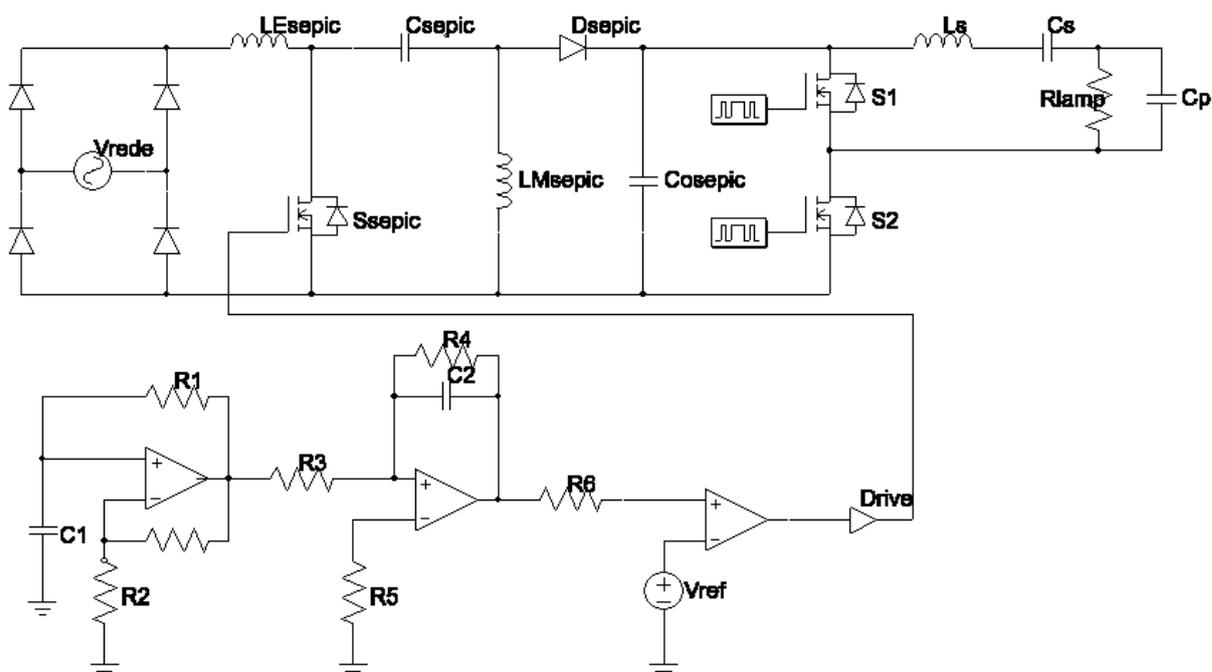


Figura 34. Circuito completo do reator eletrônico.

Fonte: Autoria própria.

4.3 SIMULAÇÃO DO REATOR ELETRÔNICO COMPLETO

Um circuito similar ao da Figura 34 foi simulado no *software* OrCAD® com o modelo da lâmpada, conforme a Equação 50, e também, para diferentes valores de tensão de referência (V_{ref}). No Apêndice A, é mostrado o circuito simulado no *software* OrCAD®. Nas Figuras 35 e 36, temos a tensão e corrente sobre a lâmpada, com uma tensão de referência de 5,7 V, que corresponde a uma razão cíclica de 30%.

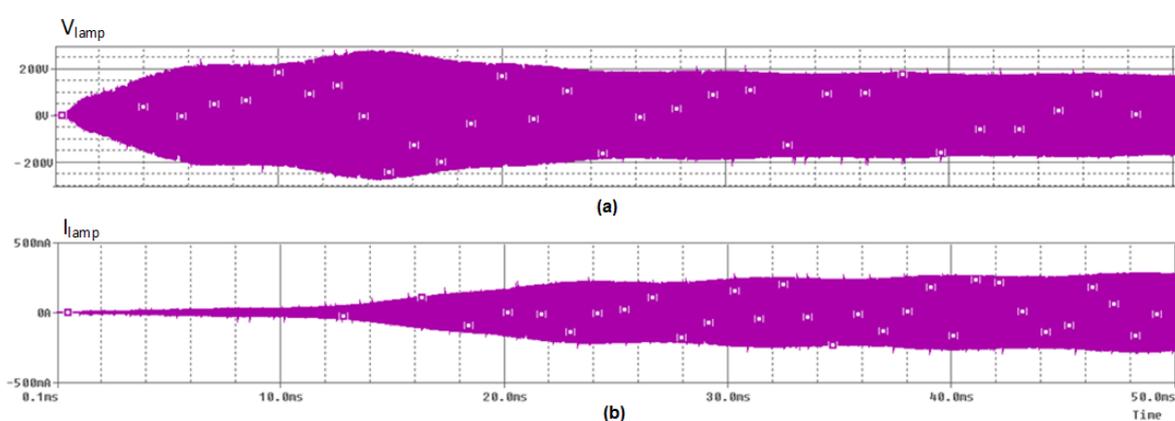


Figura 35. (a) Tensão, e (b), corrente sobre a lâmpada nos instantes iniciais da simulação (razão cíclica de 30%).

Fonte: Autoria própria.

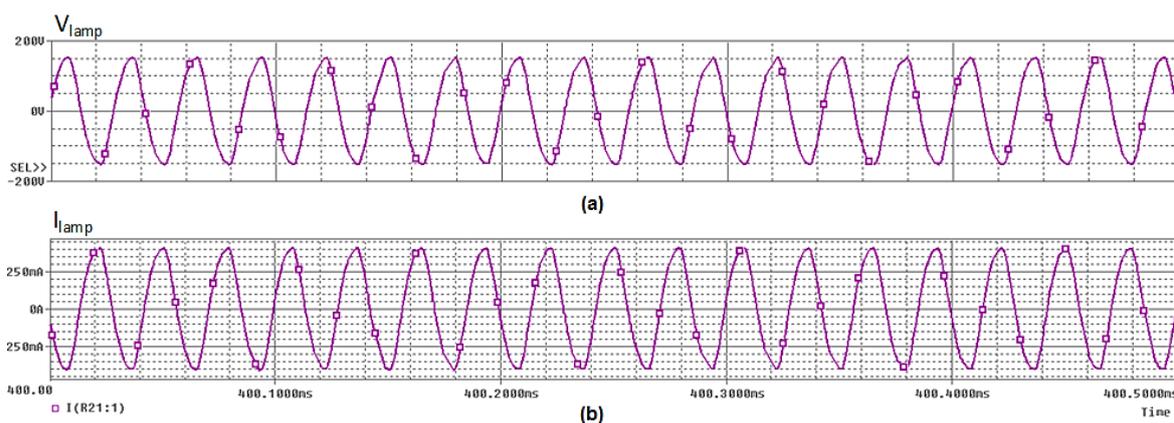


Figura 36. (a) Tensão, e (b), corrente sobre a lâmpada em regime permanente (razão cíclica de 30%).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 35 (a), pode-se notar a tensão com um pequeno valor inicial, e depois, um aumento considerável. No primeiro caso, o baixo valor é devido a tensão de saída do conversor SEPIC também estar com valor pequeno. No segundo, vemos a resposta do filtro com ganho elevado de tensão no momento da ignição.

Depois, a tensão sobre a lâmpada se estabiliza. Na Figura 35 (b), a corrente na lâmpada é pequena no início da simulação devido a potência na lâmpada ser pequena. Dessa forma, pela Equação 50, para uma entrada de potência pequena, a resistência é alta, e conseqüentemente, a corrente também é baixa. Na Figura 36 (a) e (b), temos a magnitude da corrente e tensão num tempo de simulação no qual os valores são estáveis.

Na Figura 37, a seguir, temos a potência na lâmpada em regime permanente (em watts), para uma razão cíclica do conversor SEPIC de 30%.

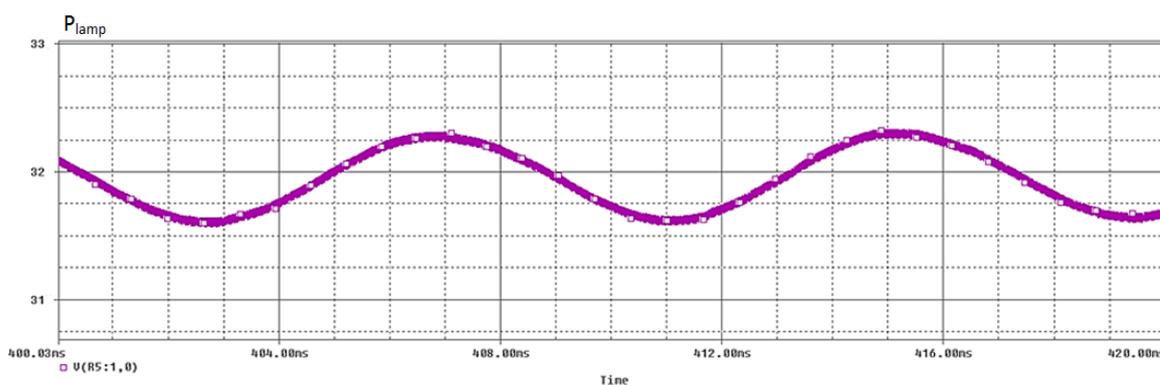


Figura 37. Potência na lâmpada em regime permanente (razão cíclica de 30%).
Fonte: Autoria própria.

A tensão de barramento na saída do conversor SEPIC V_{bus} , é mostrada na Figura 38, para uma razão cíclica de 30%.

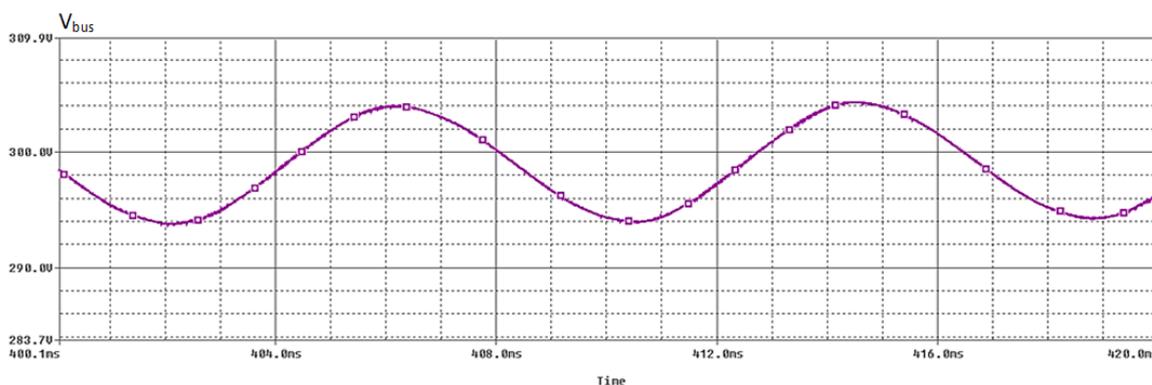


Figura 38. Tensão de saída do conversor SEPIC em regime permanente (razão cíclica de 30%).
Fonte: Autoria própria.

Em regime permanente e com razão cíclica de 30%, obteve-se uma tensão de saída do conversor SEPIC de aproximadamente 298 V e a potência lâmpada atingiu 31,4 W.

Na Figura 39 é mostrada a tensão (curva em vermelho) e a corrente (curva em azul, multiplicada 100 vezes), de entrada do conversor SEPIC para uma razão cíclica de 30%.

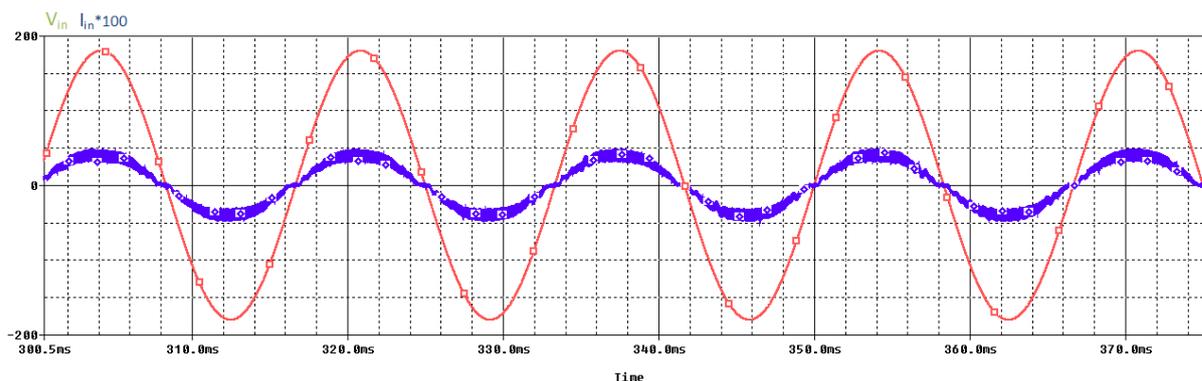


Figura 39. Tensão e corrente de entrada do reator (razão cíclica de 30%).
Fonte: Autoria própria.

Através dos valores da corrente e tensão de entrada do estágio CFP obteve-se um FP de 0,987.

O espectro da corrente de entrada do reator no estágio de CFP (SEPIC PFP), para uma razão cíclica de 30%, a partir do primeiro harmônico (60 Hz) até o quadragésimo (2.400 Hz), é mostrado na Figura 40.

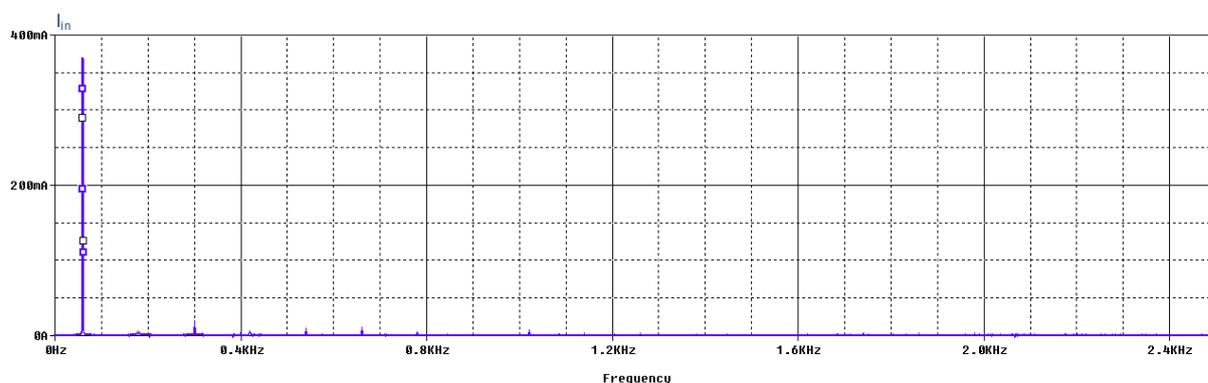


Figura 40. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (1° ao 40° harmônico, amplitude em miliamperes e razão cíclica de 30%).
Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 mostra o espectro da corrente de entrada do reator, para uma razão cíclica de 30%, a partir do terceiro harmônico (180 Hz), até o trigésimo nono (2340 Hz).

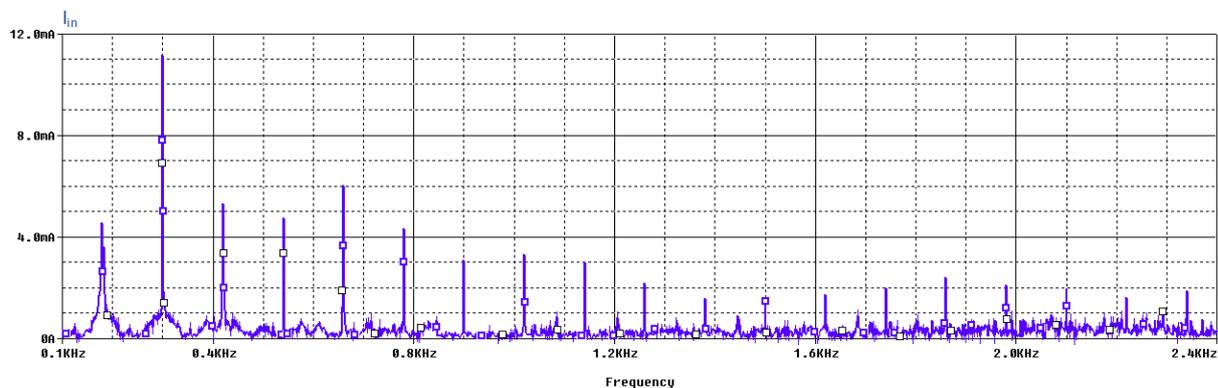


Figura 41. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (3° ao 39° harmônico, amplitude em miliamperes e razão cíclica de 30%).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 40 pode ser vista a magnitude dos harmônicos da corrente de entrada na qual o primeiro (60 Hz) é mais evidente, e os demais podem ser melhor observados numa ampliação mostrada na Figura 41.

A seguir, será feita uma simulação com um valor de V_{ref} menor, ou seja, como se o LDR estivesse em um ambiente recebendo luz excedente a da iluminação artificial, e então, o circuito de seleção de razão cíclica vai variar a PWM para um valor menor. Assim, o esperado é de que a potência sobre a lâmpada diminua, indicando a dimerização. As Figuras 42 e 43 mostram a tensão e corrente na lâmpada para uma tensão de referência de 8 V, que corresponde a uma razão cíclica de 20%.

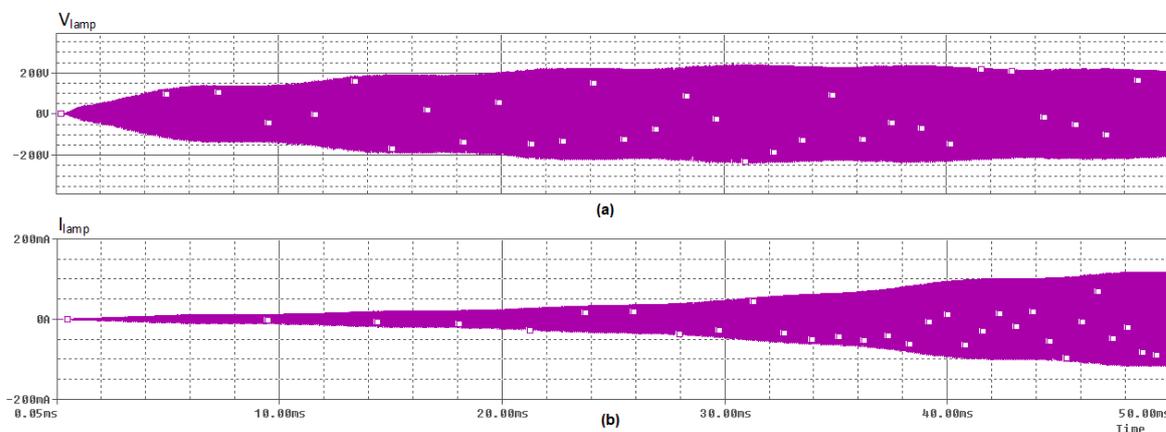


Figura 42. (a) Tensão, e (b), corrente sobre a lâmpada nos instantes iniciais da simulação (razão cíclica de 20%).

Fonte: Autoria própria.

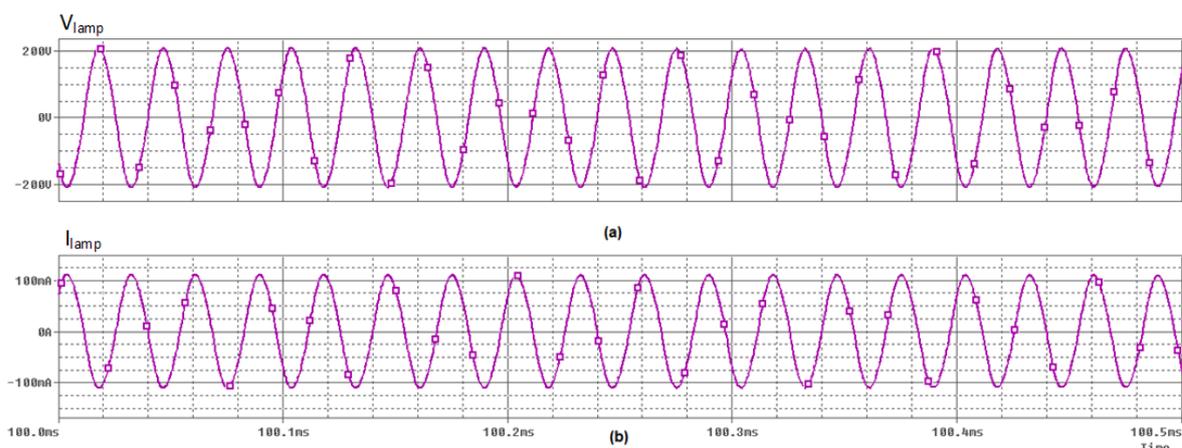


Figura 43. (a) Tensão, e (b), corrente sobre a lâmpada em regime permanente (razão cíclica de 20%).
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 42 (a), vemos que a máxima tensão sobre a lâmpada nos instantes iniciais da simulação diminuiu. Na Figura 43 (a), o valor da tensão de pico sobre a lâmpada em regime permanente aumentou pela ação do ganho do filtro ressonante, pois a resistência equivalente da lâmpada aumentou, mudando assim, a impedância do filtro. Dessa forma, a corrente na lâmpada diminuiu, como pode ser visto na figura 43 (b), compensando a esperada diminuição na potência da lâmpada (em watts), mostrada na Figura 44.

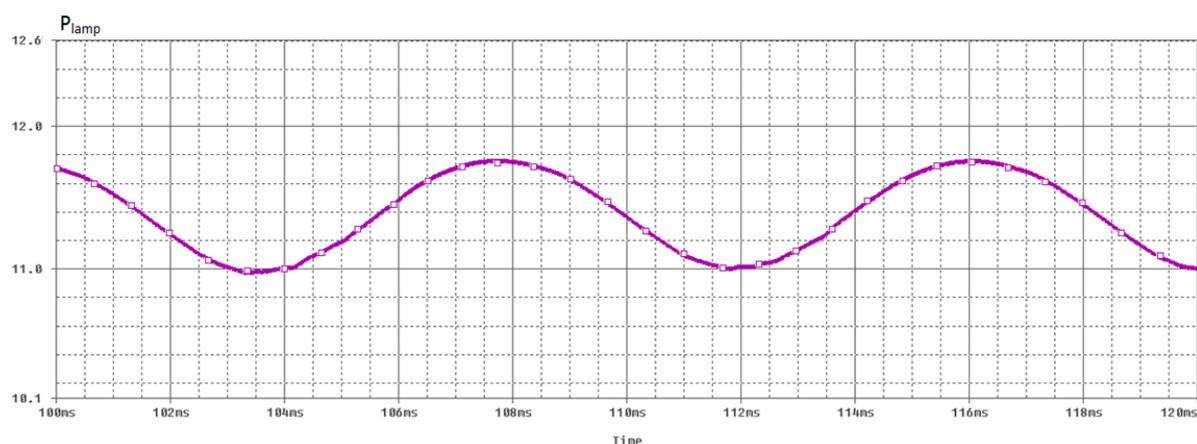


Figura 44. Potência na lâmpada em regime permanente (razão cíclica de 20%).
Fonte: Autoria própria.

Com a diminuição da razão cíclica de 30% para 20%, a tensão de saída do conversor SEPIC caiu para pouco mais de 150 V, como mostrado na Figura 45.

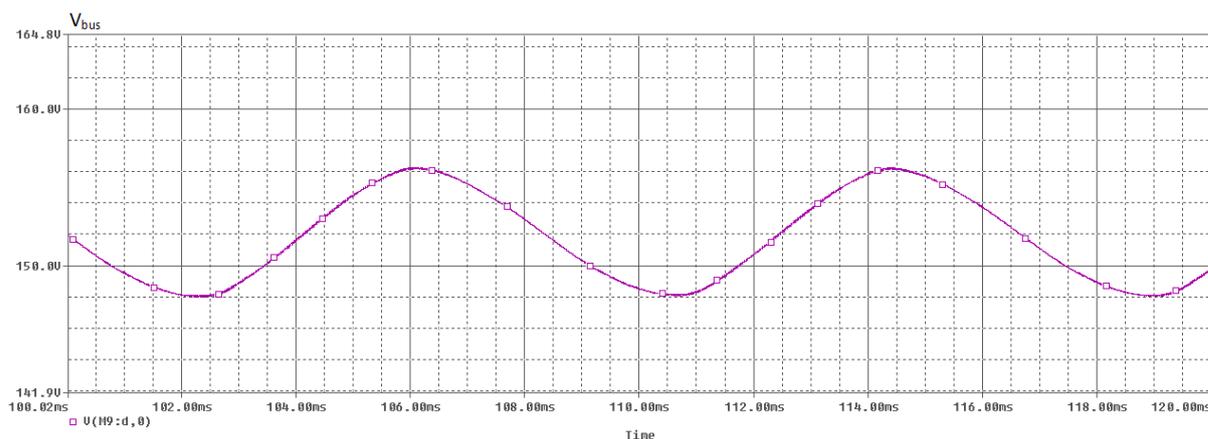


Figura 45. Tensão de saída do conversor SEPIC em regime permanente (razão cíclica de 20%).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 46 é mostrada a tensão (curva em vermelho) e a corrente (curva em azul, multiplicada 200 vezes) de entrada do reator no estágio de CFP, com razão cíclica de 20%.

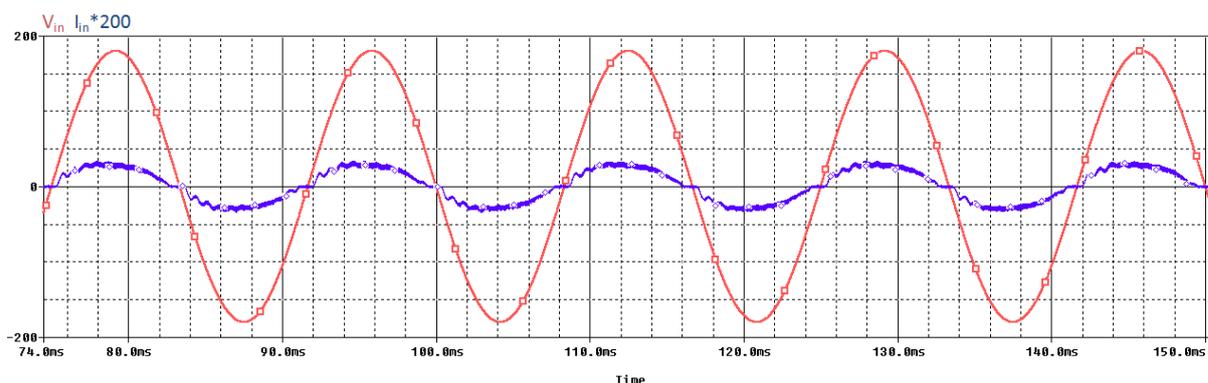


Figura 46. Tensão e corrente de entrada do reator (razão cíclica de 20%).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 46 é possível observar maior distorção na forma de onda da corrente se comparada à curva da Figura 39. Esse fato impacta diretamente no fator de potência para a operação em 12 W (razão cíclica de 20%). Com os valores da corrente e da tensão da Figura 46 obteve-se um FP de 0,967.

Para avaliar as condições impostas pela norma IEC 61000-3-2 com a razão cíclica de 20%, tensão de barramento de 150 V e potência na lâmpada de 12 W, também é mostrado o espectro da corrente de entrada do reator. Na Figura 47 é mostrado o espectro da corrente de entrada a partir do primeiro harmônico (60 Hz) até o quadragésimo (2.400 Hz).

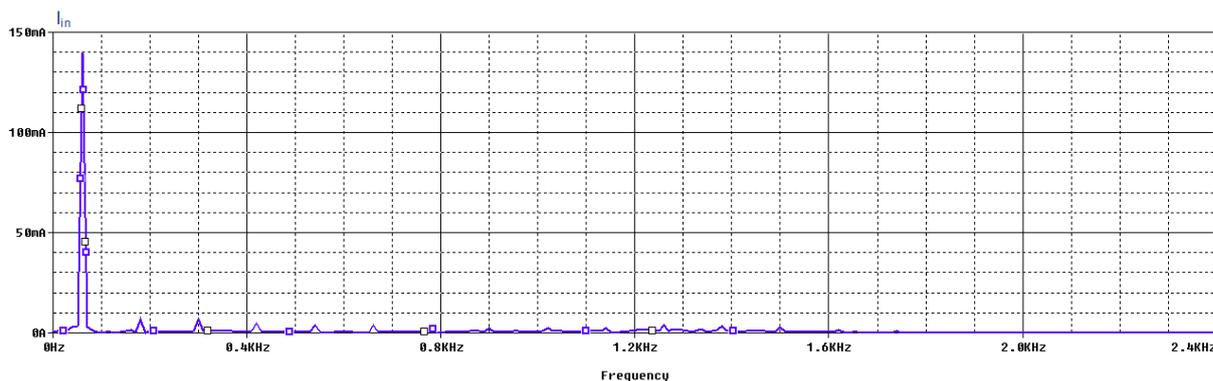


Figura 47. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (1° ao 40° harmônico, amplitude em miliamperes e razão cíclica de 20%).
Fonte: Autoria própria.

A Figura 48 mostra o espectro da corrente de entrada do reator, para uma razão cíclica de 30%, a partir do terceiro harmônico (180 Hz), até o trigésimo nono (2340 Hz).

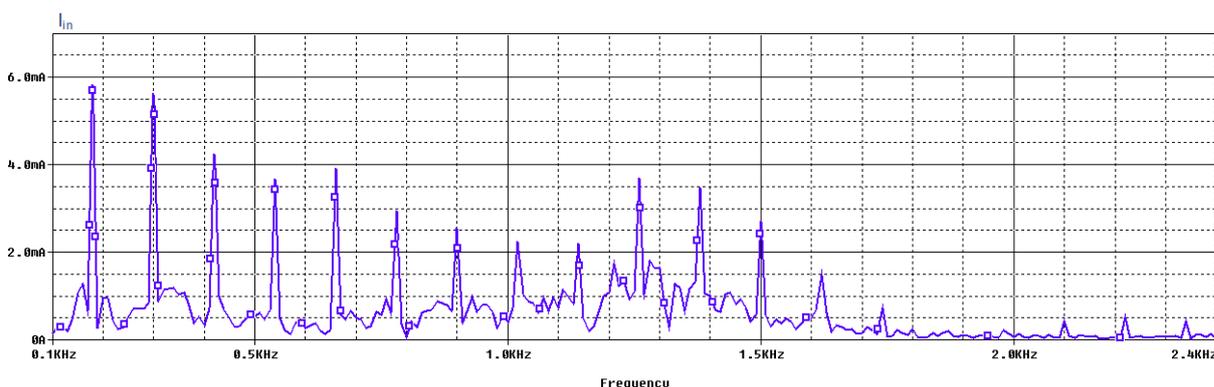


Figura 48. Espectro da corrente de entrada do SEPIC PFP (3° ao 39° harmônico, amplitude em miliamperes e razão cíclica de 20%).
Fonte: Autoria própria.

Das Figuras 47 e 48 observam-se as amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada do reator para uma razão cíclica de 20%. Uma comparação com a norma IEC 61000-3-2 será feita no próximo item deste mesmo capítulo, para os espectros da corrente de entrada no estágio de CFP do reator, em ambas as razões cíclicas de trabalho mostradas anteriormente (0,3 e 0,2).

4.3.1 Análise dos resultados

Os valores de projeto, bem como os resultados encontrados de tensão, corrente e potência na lâmpada, para uma tensão de referência V_{ref} de 5,7, correspondente a uma razão cíclica de 30%, estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de projeto e de simulação para o reator (razão cíclica de 30%).

Grandeza	Valores de projeto	Valores de simulação	Diferença (%)
Tensão de barramento (V_{bus})	300,0 V	298,0 V	0,66
Corrente de entrada (I_{in})	251,9 mA	263,0 mA	4,22
Fator de Potência (FP)	1,00	0,987	1,30
Tensão na lâmpada (V_{lamp})	109,0 V	109,6 V	0,54
Corrente de descarga (I_D)	290,0 mA	282,2 mA	2,68
Potência na lâmpada (P_o)	32,0 W	31,4 W	1,87

Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 6 pode-se notar que a maior diferença de valores é entre a corrente de descarga da lâmpada simulada e de projeto. Em termos de potência, obteve-se um desempenho com 31,4 W, que representa cerca de 98,13 % da potência nominal da lâmpada.

A seguir, na Tabela 7, serão apresentados os resultados de simulação da tensão, corrente e potência na lâmpada, com V_{ref} de 8 V correspondente a uma razão cíclica de 20%. Os valores encontrados serão comparados aos encontrados na simulação do item 4.1 deste mesmo capítulo, no qual a tensão de entrada do inversor é de 150 V.

Tabela 7. Resultados de simulação para o reator (razão cíclica de 20%).

Grandeza	Valores com V_{bus} fixo de 150 V	Valores de simulação	Diferença (%)
Tensão de barramento (V_{bus})	150,0 V	154,5 V	3,00
Corrente de entrada (I_{in})	94,5 mA	100,0 mA	5,50
Fator de Potência (FP)	1,00	0,967	3,30
Tensão na lâmpada (V_{lamp})	147,2 V	148,9 V	1,10
Corrente de descarga (I_D)	78,6 mA	79,5 mA	1,10
Potência na lâmpada (P_o)	12,0 W	11,4 W	2,50

Fonte: Autoria própria.

Com uma razão cíclica menor (20%) no comado do conversor SEPIC, obteve-se uma variação de potência considerável na lâmpada. Quando a tensão de barramento diminui, a tensão sobre a lâmpada aumenta, mas em compensação, a corrente diminui para um valor que permite a queda de potência.

A seguir, na Figura 49, temos uma comparação entre os valores dos harmônicos encontrados e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2, para as razões cíclicas de 30% e 20%.

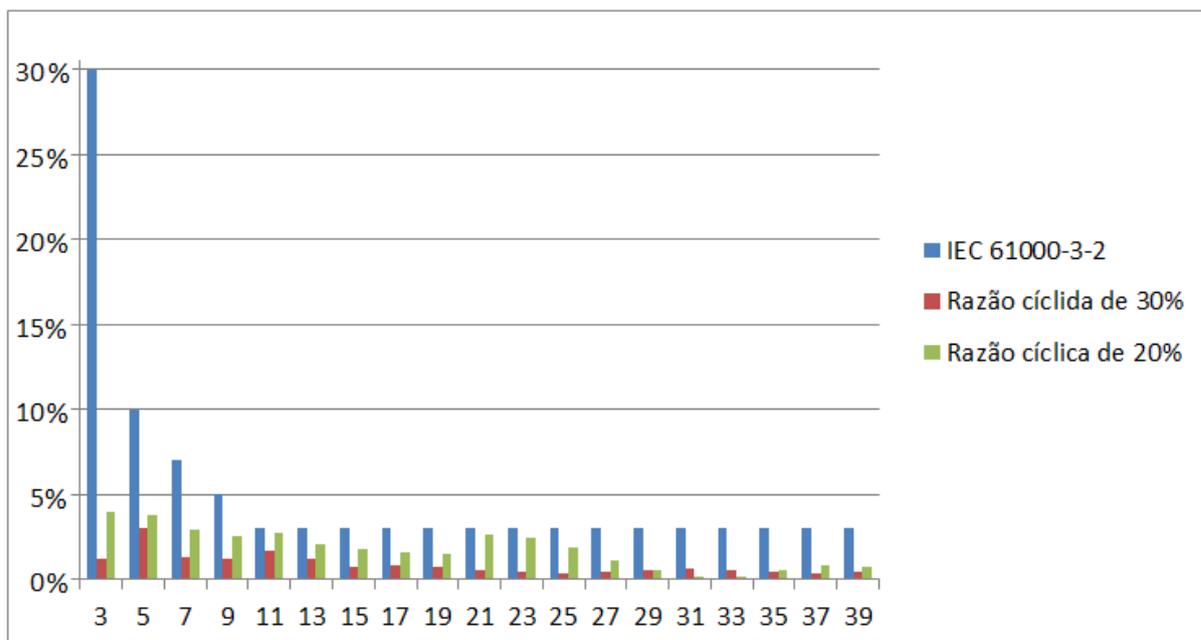


Figura 49. Valores dos harmônicos da corrente de entrada do reator e os máximos permitidos pela norma IEC 61000-3-2.

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 48 é possível observar que os valores dos harmônicos da corrente de entrada do reator proposto, estão dentro dos limites impostos pela norma IEC 61000-3-2, nos dois pontos de operação estudados (razão cíclica de 30% e 20%).

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o projeto e simulação de um reator eletrônico com elevado fator de potência e dimerizável. As topologias propostas são circuitos que apresentam características favoráveis ao propósito do trabalho e se mostraram eficientes para tal.

O conversor SEPIC mostrou-se efetivo na tarefa de converter a tensão CC retificada em um nível adequado ao estágio do inversor, e ao mesmo tempo, corrigir o fator de potência na entrada do reator. A tensão de saída do conversor atingiu o valor de 302,7 V, ficando 0,89% acima do valor de projeto (300 V). O FP atendeu a portaria 267/2009 do MDIC (0,92), com o valor de 0,989. Na comparação dos valores dos harmônicos da corrente de entrada do reator medidos, e os impostos pela norma IEC 61000-3-2, mostraram-se dentro dos limites.

No inversor e filtro ressonante, obteve-se um bom desempenho do circuito em termos de tensão, corrente e potência. A tensão sobre a lâmpada apresentou o valor de 109,5 V (0,45% acima do valor de projeto) e a corrente na lâmpada atingiu 291,2 mA (0,41% acima do valor de projeto). Para a potência na lâmpada obteve-se 31,9 W (0,31% abaixo da nominal).

Na simulação com o modelo da lâmpada, é possível ver a variação de tensão, corrente e potência para diferentes valores na tensão de entrada do inversor (300 e 150 V). Com a tensão de barramento de 300 V e 150 V, obtiveram-se respectivamente as potências de aproximadamente 32 W, e 12 W.

A simulação do circuito de seleção de razão cíclica, e os demais circuitos interligados permitiu ver como o reator responde a variações da tensão de referência V_{ref} . A dimerização se mostrou possível com a variação de V_{ref} , que se reflete nos valores de tensão, corrente e potência na lâmpada. Com a simulação para uma razão cíclica de 30% obteve-se a potência na lâmpada de 31,4 W e no estágio de CFP um FP de 0,987. Na simulação com razão cíclica de 20% a potência na lâmpada atingiu 11,4 W e o FP 0,967. Em ambos os casos o FP atendeu a portaria 267/2009 do MDIC e os harmônicos da corrente de entrada ficaram dentro dos limites impostos pela norma IEC 61000-3-2, como pode ser visto na Figura 49.

Uma ondulação presente na tensão, corrente e potência da lâmpada, pode ser visualizada nas simulações. Essa ondulação segue a forma de onda da

tensão retificada em 120 Hz, e está presente na saída do conversor SEPIC de forma que se propaga para o inversor, afetando as variáveis da lâmpada.

REFERÊNCIAS

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética (PN&F)**. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/PlanoNacEfiEnergetica.pdf> > Acesso em: 19 de jun. 2013.

_____. **Portaria Interministerial N° 1.007**. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/cgiee/Portaria_Interministerial_nx_1007_2010.pdf > Acesso em: 19 de jun. 2013.

_____. **Portaria Interministerial N° 1.008**. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/cgiee/Portaria_Interministerial_nx_1008_2010.pdf > Acesso em: 19 de jun. 2013.

BRASIL. **Lâmpadas incandescentes entre 61 e 100 watts deixarão de ser produzidas no País**. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2013/07/02z/lampadas-incandescentes-entre-60-e-100-watts-deixarao-de-ser-comercializadas-no-brasil> > Acesso em: 02/07/2013.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Portaria Interministerial N° 267/2009**. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/Rtac/pdf/RTAC001492.pdf> > Acesso em: 02/08/2013.

OSRAM. **Lâmpadas Fluorescentes Tubulares**. Disponível em: < http://www.osram.com.br/osram_br/Profissional/Iluminacao_Geral/Lampadas_Fluorescentes_Tubulares_e_Circulares/index.htm > Acesso em: 19 de jun. 2013.

OSRAM. **Manual Luminotécnico**. Disponível em: < http://www.osram.com.br/osram_br/ferramentas_&_Catlogos/Downloads/Iluminação_Geral/Manual_do_Curso_Iluminacao_Conceitos_e_Projetos796562/index.html > Acesso em: 03/08/2013.

ACHÃO, Carla da Costa Lopes. **Análise da Estrutura de Consumo de Energia pelo Setor Residencial Brasileiro**. Tese de doutorado, UFRJ – COPPE, 2003.

POLONSKII, Mikhail; SIDEL, Álysson Raniere. **Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente**. 1 ed. Ijuí: Unijuí, 2008.

LOPES, Juliano de Pelegrini. **Desenvolvimento de Metodologia do Projeto do Reator Eletrônico Auto-Oscilante Com Entrada Universal**. Dissertação de Mestrado, UFSM – PPGEE, 2010.

IEC – **International Standard IEC 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – 1995, Part 3: Limits -Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)**.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Mcgraw Hill, 2012.

POMÍLIO, José Antenor. **Conversores Cuk, SEPIC e Zeta como Pré-reguladores de Fator de Potência**. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/> > Acesso em: 10/02/2014.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2 ed. Edição dos Autores, Florianópolis: 2006.

LOPES, Juliano de P.; MENKE, Maikel F.; VENTURINI, Willian; BISOGNO, Fábio A.; SEIDEL, Álisson R. **Reator Eletrônico Auto-Oscilante com Tensão de Entrada Universal e Correção de Fator de Potência**. Eletrônica de Potência, Campo Grande, v. 18, n. 2, p. 972-981, março/maio, 2012.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

HAMMER, Edward E.; MCGOWAN, Terry K.; **Characteristics of Various F40 Fluorescent Systems at 60 Hz and High Frequency**, IEEE transaction on Industrial applications, v. 21, 1985.

ANSI. **High-frequency fluorescent lamp ballasts**. ANSI C82.11-1992

KAISER, W. **Conversor eletrônico de alta eficiência para alimentação de lâmpadas fluorescentes tubulares – uma metodologia de projeto**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

Dos SANTOS, Anderson Soares . **Reator Eletrônico Multifrequência para Lâmpada Fluorescente T5 com Pré-Aquecimento por Tensão**. Dissertação de Mestrado, PUC RS – 2010.

BISOGNO, Fábio E.; SEIDEL, Álisson R.; HOLSBACH, Rodolfo; PRADO, Ricardo N. do. **Resonant Filter Applications in Electronic Ballast**, IEEE transaction on Industrial applications, v. 1, 2002.

LOPES, Juliano de Pelegrini. **Projeto e Implementação de Reatores Eletrônicos para Reconhecimento de Lâmpadas Fluorescentes**. Tese, UFSM – PPGEE, 2012.

SEIDEL, Á. R.; PERDIGÃO, M. S.; MARQUES, H. V.; ALONSO, J. M.; SARAIVA E. S. **Safe Electrode Operation in Universal Electronic Ballast**, IEEE, Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian.

CERVI, Murilo; SEIDEL, Álysson R.; BISOGNO, Fábio E.; PRADO, Ricardo N. do. **Fluorescent Lamp Model Based on the Equivalent Resistance Variation**, IEEE Industry Applications Conference, vol.1, 2002.

OSRAM. **Famili Lumilux T8 Lamps**. Datasheet, 2013.

LOPES, Juliano de Pelegrini ; SILVA, M. F. ; MENKE, M. F. ; LUZ, P. C. ; BORIN, V. ; SEIDEL, A. R. BISOGNO, Fábio E. **Self-Oscillating Electronic Ballast with Lighting Intensity Regulation**. CBA – Congresso Brasileiro de Automática, 2010.

PERTENCE JÚNIOR, Antônio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

APENDICE A

Esquemáticos das simulações no PSIM e OrCAD

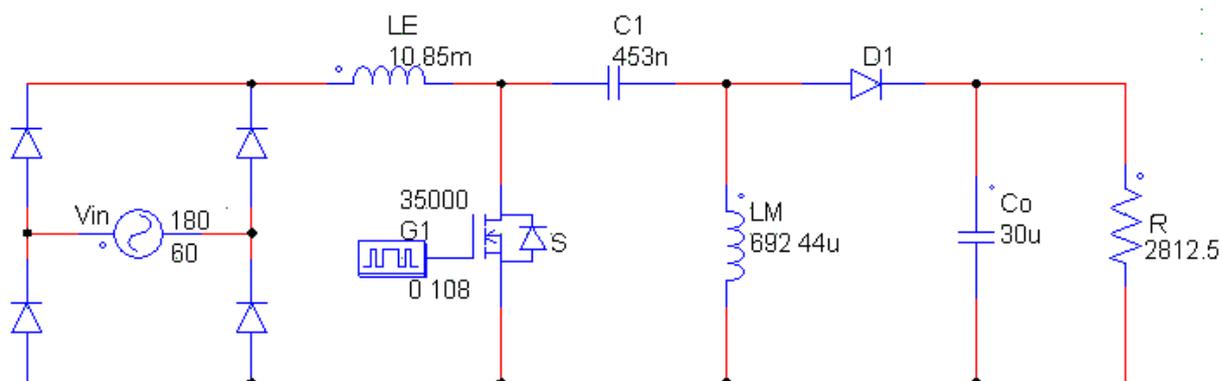


Figura A1. Esquemático do conversor SEPIC como PFP no *software* PSIM.

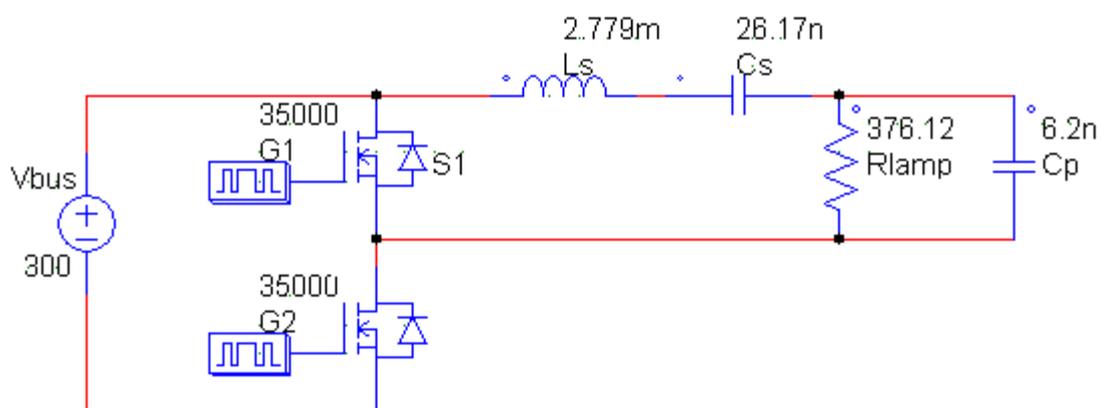


Figura A2. Esquemático do inversor e filtro ressonante no *software* PSIM.

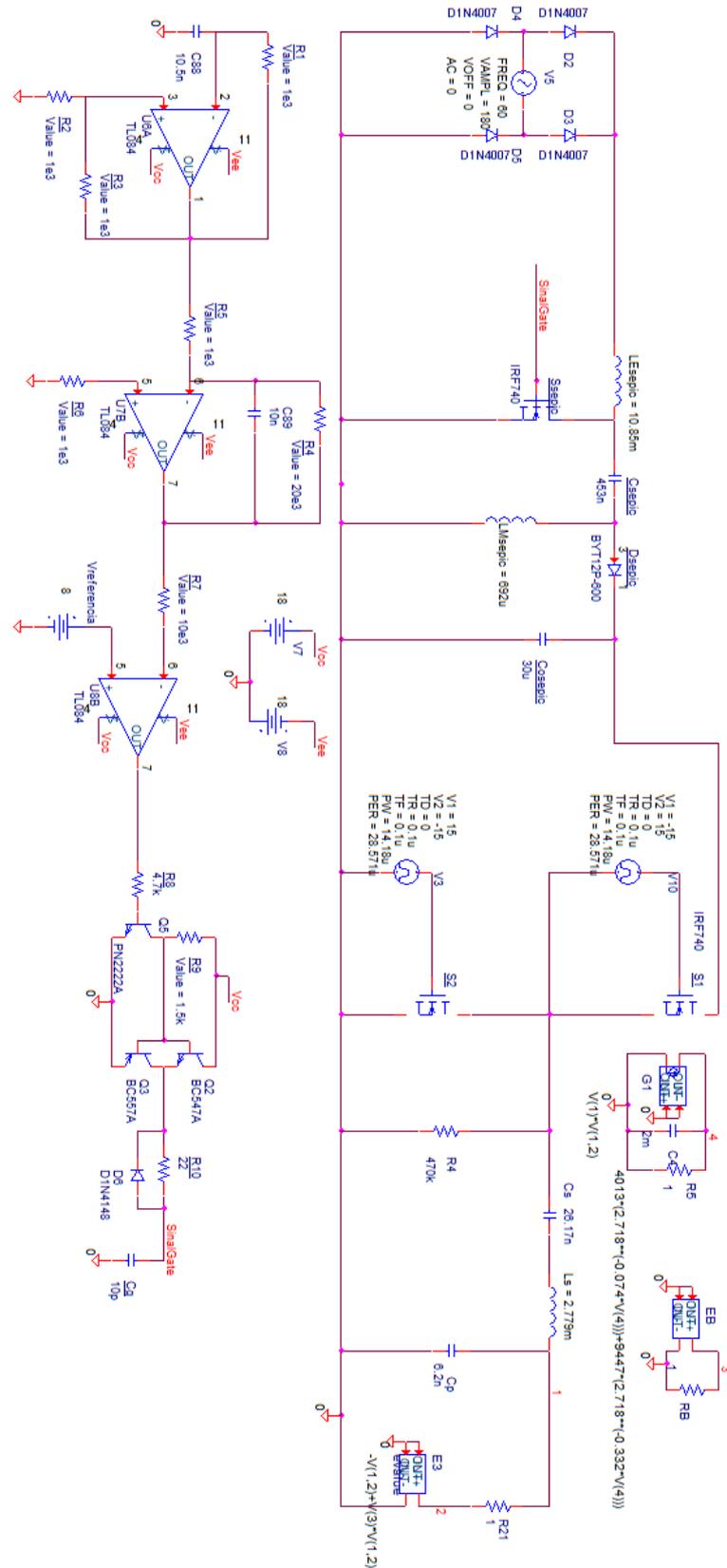


Figura A3. Esquemático do circuito total do reator eletrônico simulado, e modelo da lâmpada no *software* OrCAD.