

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

**LUCAS ALBERTO FACHINELLO**

**ESTUDO DE *DRIVER* PARA ACIONAMENTO DE LÂMPADA LED**  
**APLICADO EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2015**

LUCAS ALBERTO FACHINELLO

**ESTUDO DE *DRIVER* PARA ACIONAMENTO DE LÂMPADA LED  
APLICADO EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

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

Orientador: Prof. Juliano de Pelegrini Lopes.

PATO BRANCO

2015

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO DE *DRIVER* PARA ACIONAMENTO DE LÂMPADA LED APLICADO EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**, do aluno **LUCAS ALBERTO FACHINELLO** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **71** de 2015.

Fizeram parte da banca os professores:

**Juliano de Pelegrini Lopes**

**Carlos Marcelo de Oliveira Stein**

**Marcelo Flavio Guepfrih**

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, meus pais e a todos que fizeram parte do início da minha caminhada profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao pai celestial por ter me guiado e concebido condições espirituais e psicológicas para enfrentar todos os momentos de avaria.

A minha família, por ter me dado sustentabilidade nas horas difíceis e por toda a luta dedicada a minha educação.

Agradeço também todos os professores e amigos do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR campus Pato Branco, por terem participado do começo da minha jornada profissional, quero ressaltar com grande alegria os professores Diogo Vargas e Juliano de Pelegrini Lopes, orientador, que me guiaram nesse trabalho.

## EPÍGRAFE

“Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança”.  
*Stephen Hawking*

## RESUMO

**FACHINELLO, Lucas Alberto. Estudo de driver para acionamento de lâmpada LED aplicado em iluminação pública. 2015. 147 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.**

A iluminação pública surgiu com o intuito de fornecer mas conforto e segurança para a população na ausência da luz solar, no entanto é evidente a necessidade de se pesquisar novas fontes de iluminação mais eficientes que as atuais utilizadas. A tecnologia LED do inglês (*Lighting Emitting Diode*) surgiu como uma opção para a iluminação pública pois segundo Camponogara (p.41 2012) são mais resistentes a choques, vibrações, possuem elevada vida útil e são mais eficientes quando comparadas com as lâmpadas de vapor de sódio utilizadas na iluminação pública. O presente trabalho apresenta uma comparação das topologias de conversores CC-CC não isolados aplicados para acionamento de luminárias de LED's para iluminação pública. Será apresentado o projeto e a simulação das topologias buck, buck-boost, Cuk, SEPIC e ZETA para duas configurações de carga, a primeira denominada projeto 1 consiste em uma matriz de 40 LED's de potência ligados em série, totalizando uma potência de 75W e a segunda (projeto 2) para dois vetores em paralelo de 20 LED's cada, também totalizando 75W. Após o projeto e a simulação será analisado os esforços que cada topologia exerce em seus semicondutores, dimensão dos componentes projetados e se as topologias conseguem manter um nível máximo de 1% de variação de tensão e corrente na carga. Posteriormente será feita uma comparação entre os dois projetos, determinando qual dos projetos exerce os menores esforços nos semicondutores. A topologia escolhida representara o estágio PC (controlador de potência) no processo de acionamento dos LEDs.

**Palavras-chave:** LED's de potência. Conversores CC-CC não isolados. Estágio de controle de potência. Iluminação pública.

## ABSTRACT

FACHINELLO, Lucas Alberto. Information and knowledge sharing in special libraries. 2015. 147 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

The street lights came up in order to provide comfort and safety but for the population in the absence of sunlight, however it is evident the need of researching new, more efficient lighting that current used. The English LED technology (Lighting Emitting Diode) has emerged as an option for street lighting because according Camponogara (p.41 2012) are more resistant to shock, vibration, have long service life and are more efficient when compared to vapor lamps sodium used in street lighting. This paper presents a comparison of the topologies of converters DC-DC non-isolated applied to LED luminaires drive for street lighting. It will present the design and simulation of buck topologies, buck-boost, Cuk, SEPIC and ZETA for two load configurations, the first named Project 1 consists of an array of 40 LEDs power connected in series, with a total power of 75W and the second (Project 2) for two vectors parallel of 20 LEDs each, also totaling 75W. After the project and the simulation will be discussed the efforts that each topology exercises in its semiconductors, size of engineered components and topologies can maintain a maximum level of 1% variation of voltage and current in the load. Subsequently a comparison between the two projects will be done by determining which of the projects exerts less effort in semiconductors. The topology chosen represented the PC stage (power controller) the switching operation of the LEDs.

**Keywords:** Power LEDs. non-isolated DC-DC converters. Power controller stage. Street lighting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração do processo de emissão de luz do LED. ....	12
Figura 2: Modelo elétrico do LED. ....	14
Figura 3: Curva tensão vs corrente. ....	14
Figura 4: Luminária de LED para iluminação pública, ....	15
Figura 5: Diagrama em blocos do <i>driver</i> , ....	16
Figura 6: Topologias de conversores CC-CC. ....	18
Figura 7: Arranjo de LEDs para o projeto 1. ....	19
Figura 8: Arranjo de LEDs para o projeto 2. ....	20
Figura 9: Formas de onda da corrente na carga. ....	22
Figura 10: Conversor CC-CC <i>buck</i> . ....	24
Figura 11: Conversor <i>buck</i> operando com chave S fechada. ....	24
Figura 12: Conversor <i>buck</i> operando com chave S aberta. ....	26
Figura 13: Conversor <i>Buck</i> acionando uma matriz de 40 LEDs de potência em série. .....	28
Figura 14: Forma de onda da tensão aplicada na carga do conversor <i>buck</i> , projeto 1. .....	31
Figura 15: Forma de onda da corrente aplicada na carga do conversor <i>buck</i> , projeto 1. ....	32
Figura 16: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1. .....	33
Figura 17: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1. ....	33
Figura 18: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1. ....	34
Figura 19: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1. .....	34
Figura 20: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente no indutor, projeto 1. ....	35
Figura 21: Conversor <i>buck</i> acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada. ....	36
Figura 22: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	37
Figura 23: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2. .....	37
Figura 24: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2. .....	38
Figura 25: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2. ....	39
Figura 26: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2. ....	39
Figura 27: Conversor <i>buck</i> , forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2. .....	40
Figura 28: Forma de onda da corrente no indutor. ....	40
Figura 29: Conversor <i>buck-boost</i> . ....	42
Figura 30: Funcionamento do conversor <i>buck-boost</i> quando a chave S está fechada. .....	43

Figura 31: Funcionamento do conversor <i>buck-boost</i> quando a chave S está aberta.	44
Figura 32: Conversor <i>buck-boost</i> acionando uma matriz de 40 LEDs de potência. ...	45
Figura 33: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	49
Figura 34: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	49
Figura 35: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1. ....	50
Figura 36: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1. ....	50
Figura 37: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1. ....	51
Figura 38: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1. ....	51
Figura 39: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente no indutor, projeto 1. ...	52
Figura 40: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	54
Figura 41: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	54
Figura 42: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2. ....	55
Figura 43: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2. ....	56
Figura 44: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2. ....	56
Figura 45: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2. ....	57
Figura 46: Conversor <i>buck-boost</i> , forma de onda da corrente no indutor, projeto 2. ...	57
Figura 47: Circuito elétrico do conversor CuK. ....	59
Figura 48: Conversor Cuk representando a etapa de operação 1, quando a chave S está conduzindo. ....	60
Figura 49: Conversor Cuk quando a chave S está aberta. ....	62
Figura 50: Conversor Cuk acionando uma matriz de 40 LEDs de potência. ....	63
Figura 51: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1. ...	67
Figura 52: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	68
Figura 53: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1. ....	68
Figura 54: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1. ....	69
Figura 55: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1. ...	69
Figura 56: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1. ...	70
Figura 57: Conversor Cuk acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada. ...	71

Figura 58: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2...	72
Figura 59: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2. .....	72
Figura 60: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2. .....	73
Figura 61: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2. ....	73
Figura 62: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2...	74
Figura 63: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.	74
Figura 64: Conversor CC-CC SEPIC. ....	76
Figura 65: Funcionamento do conversor SEPIC, para etapa 1. ....	77
Figura 66: Funcionamento do conversor SEPIC, etapa 2. ....	79
Figura 67: Conversor SEPIC acionando uma matriz de 40 LEDs de potência.....	81
Figura 68: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1. .....	85
Figura 69: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	86
Figura 70: Conversor SEPIC, Forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1. ....	87
Figura 71: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1. ....	87
Figura 72: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1. .....	88
Figura 73: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1. ....	88
Figura 74: Conversor SEPIC acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada. .....	89
Figura 75: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2. .....	90
Figura 76: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	91
Figura 77: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2. ....	92
Figura 78: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2. ....	92
Figura 79: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2. .....	93
Figura 80: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2. ....	93
Figura 81: Esquema elétrico do conversor Zeta.....	95
Figura 82: Funcionamento do conversor Zeta no período em que a chave S está conduzindo. ....	96
Figura 83: Funcionamento do conversor Zeta no período em que a chave S está aberta. ....	97

Figura 84: Projeto do conversor ZETA para uma matriz de 40 LEDs em série. ....	99
Figura 85: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1 .....	103
Figura 86: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1. .....	103
Figura 87: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1. ....	104
Figura 88: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1. ....	104
Figura 89: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1. .....	105
Figura 90: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1. .....	105
Figura 91: Conversor ZETA acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada. .....	106
Figura 92: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2. .....	107
Figura 93: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2 .....	108
Figura 94: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2. ....	109
Figura 95: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2. ....	109
Figura 96: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2. .....	110
Figura 97: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2. .....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros elétricos para o projeto 1.....	20
Tabela 2: Parâmetros elétricos para o projeto 2.....	21
Tabela 3: Premissas de projeto para os conversores .....	21
Tabela 4: Parâmetros do conversor <i>buck</i> .....	31
Tabela 5: Valores da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	31
Tabela 6: Conversor <i>buck</i> , valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.....	32
Tabela 7: Conversor <i>buck</i> , valor máximo de tensão aplicado na chave S, projeto 1.....	33
Tabela 8: Conversor <i>buck</i> , valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.....	33
Tabela 9: Conversor <i>buck</i> , valores de tensão aplicado no diodo projeto 1. ....	34
Tabela 10: Conversor <i>buck</i> , valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.....	34
Tabela 11: Parâmetros do conversor <i>buck</i> para o projeto 2.....	36
Tabela 12: Conversor <i>buck</i> , valores da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	37
Tabela 13: Conversor <i>buck</i> , valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.....	38
Tabela 14: Conversor <i>buck</i> , valores de tensão aplicado na chave S, projeto 2. ....	38
Tabela 15: Conversor <i>buck</i> , valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.....	39
Tabela 16: Conversor <i>buck</i> , valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2. ....	39
Tabela 17: Conversor <i>buck</i> , valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2. ....	40
Tabela 18: Parâmetros do conversor <i>buck-boost</i> , para o projeto 1.....	48
Tabela 19: Conversor <i>buck-boost</i> , valores da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	49
Tabela 20: Conversor <i>buck-boost</i> , valores da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	49
Tabela 21: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de tensão aplicado na chave S, projeto 1. ....	50
Tabela 22: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1. ....	50
Tabela 23: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de tensão aplicados no diodo, projeto 1.....	51
Tabela 24: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1. ....	51
Tabela 25: Parâmetros do conversor <i>buck-boost</i> aplicado a uma matriz com 2 vetores de 20 LEDs cada. ....	53
Tabela 26: Conversor <i>buck-boost</i> , valores da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	54
Tabela 27: Conversor <i>buck-boost</i> , valores da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	55
Tabela 28: Conversor <i>buck-boost</i> , valor de tensão aplicado na chave S, projeto 2. ....	55
Tabela 29: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2. ....	56
Tabela 30: Conversor <i>buck-boost</i> , valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2. ....	56
Tabela 31: Conversor <i>buck-boost</i> , valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2. ....	57
Tabela 32: Parâmetros do conversor Cuk, para o projeto 1. ....	66

Tabela 33: Conversor Cuk, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	67
Tabela 34: Conversor Cuk, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	68
Tabela 35: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	69
Tabela 36: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	69
Tabela 37: Conversor Cuk, valor da tensão aplicado no diodo, projeto 1. ....	70
Tabela 38: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1. ....	70
Tabela 39: Parâmetros do conversor Cuk aplicado a uma matriz com 2 vetores de LED. ....	71
Tabela 40: Conversor Cuk, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	72
Tabela 41: Conversor Cuk, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	72
Tabela 42: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	73
Tabela 43: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	74
Tabela 44: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2. ....	74
Tabela 45: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2. ....	74
Tabela 46: Parâmetros para projeto do conversor SEPIC para o primeiro arranjo de LEDs. ....	85
Tabela 47: Conversor SEPIC, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	86
Tabela 48: Conversor SEPIC, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	86
Tabela 49: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	87
Tabela 50: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	87
Tabela 51: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 1. ....	88
Tabela 52: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1. ....	88
Tabela 53: Conversor SEPIC, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	91
Tabela 54: Conversor SEPIC, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	91
Tabela 55: Conversor SEPIC, valores de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	92
Tabela 56: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	92
Tabela 57: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2. ....	93
Tabela 58: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2. ....	93
Tabela 59: Parâmetros do conversor ZETA. ....	102
Tabela 60: Conversor ZETA, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1. ....	103
Tabela 61: Conversor ZETA, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1. ....	103
Tabela 62: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	104
Tabela 63: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 1. ....	104
Tabela 64: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 1. ....	105
Tabela 65: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1. ....	105
Tabela 66: Parâmetros do conversor ZETA aplicado a uma matriz com 2 vetores de LED. ....	107
Tabela 67: Conversor ZETA, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2. ....	107
Tabela 68: Conversor ZETA, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2. ....	108
Tabela 69: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	109
Tabela 70: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado na chave $S$ , projeto 2. ....	109
Tabela 71: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2. ....	110
Tabela 72: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2. ....	110
Tabela 73: Esforços máximos na chave $S$ e no diodo $D$ para cada conversor. ....	112

Tabela 74: Comparativo entre os componentes dos conversores estudados. ....	113
Tabela 75: Valores dos esforços máximos nos semicondutores.....	114
Tabela 76: Comparativo entre os componentes dos conversores estudados. ....	114
Tabela 77: Valores dos esforços máximos nos semicondutores.....	114

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. DIODOS EMISSORES DE LUZ.....	12
2.1 ACIONAMENTO DOS LEDS.....	15
2.2 CONVERSORES DE POTÊNCIA .....	16
2.3 CARGAS A SEREM ACIONADAS .....	19
2.4 PREMISSAS DE PROJETO.....	21
3 CONVERSOR CC-CC <i>BUCK</i> .....	24
3.1 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> COM A CHAVE S FECHADA ....	24
3.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> COM A CHAVE S ABERTA.....	26
3.3 GANHO ESTÁTICO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> .....	27
3.5 PROJETO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE.....	28
3.5.1 Definição do ganho estático .....	29
3.5.2 Dimensionamento do indutor.....	29
3.5.3 Dimensionamento do capacitor. ....	30
3.5.4 Dimensionamento da chave <i>S</i> e do diodo <i>D</i> .....	30
3.5.5 Resultados de simulação .....	31
3.6 PROJETO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS EM SÉRIE.....	35
3.6.1 Resultados de simulação .....	37
4 CONVERSOR CC-CC <i>BUCK-BOOST</i> .....	42
4.1 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> COM A CHAVE S FECHADA .....	42
4.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> COM A CHAVE S ABERTA.....	44
4.4 PROJETO DO CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE.....	45

4.4.1	Calculo do ganho estático. ....	45
4.4.2	Dimensionamento do indutor.....	46
4.4.3	Dimensionamento do capacitor. ....	46
4.4.4	Dimensionamento do diodo.....	47
4.4.5	Dimensionamento da chave S.....	47
4.4.6	Resultados de simulação .....	48
4.5	PROJETO DO CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS EM SÉRIE .....	53
4.5.1	Resultados de simulação .....	54
5	CONVERSOR CUK.....	59
5.1	FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR CUK COM A CHAVE S FECHADA .....	60
5.2	FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR CUK COM A CHAVE S ABERTA..	61
5.3	PROJETO DO CONVERSOR CUK UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE.....	63
5.3.1	Calculo do ganho estático .....	63
5.3.2	Dimensionamento do indutor $L_1$ .....	64
5.3.3	Dimensionamento do indutor $L_2$ .....	64
5.3.4	Dimensionamento do capacitor ( $C_1$ ).....	65
5.3.5	Dimensionamento do capacitor $C_2$ .....	65
5.3.6	Dimensionamento da chave S e do diodo .....	66
5.3.7	Resultados de simulação .....	67
6	CONVERSOR CC-CC SEPIC.....	76
6.1	ANÁLISE DA ETAPA 1.....	77
6.2	ANÁLISE DA ETAPA 2.....	79
6.4	PROJETO DO CONVERSOR SEPIC UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE.....	80
6.4.1	Definição do ganho estático: .....	81
6.4.2	Dimensionamento de $L_1$ .....	81

6.4.3 Dimensionamento de $L_2$ .....	82
6.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_1$ .....	82
6.4.5 Dimensionamento do capacitor $C_2$ .....	83
6.4.6 Dimensionamento da chave de potência $S$ e do diodo $D$ .....	83
6.4.7 Resultados de simulação .....	85
6.5 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS .....	89
6.5.1 Resultados de simulação .....	90
7 CONVERSOR CC-CC ZETA.....	95
7.1 ANÁLISE DA ETAPA 1.....	96
7.2 ANÁLISE DA ETAPA 2.....	97
7.4 PROJETO DO CONVERSOR ZETA ACIONANDO UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE .....	98
7.4.1 Calculo do ganho estático .....	99
7.4.2 Dimensionamento do indutor $L_1$ .....	99
7.4.3 Dimensionamento do indutor $L_2$ .....	100
7.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_1$ .....	100
7.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_2$ .....	101
7.4.6 Dimensionamento da chave $S$ e do diodo $D$ .....	101
7.4.7 Resultados de simulação .....	102
7.5 PROJETO DO CONVERSOR ZETA UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS .....	106
7.5.1 Resultado de simulação .....	107
8 RESULTADOS .....	112
9 CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS.....	117

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo moderno é evidente a necessidade da humanidade pesquisar novas fontes de energia, mas não mais importante que pesquisar novas fontes de energia é a utilização racional da energia já existe (SÁ JUNIOR, 2010).

A iluminação pública foi desenvolvida com intuito de fornecer mais conforto e qualidade de vida noturna para a população. No entanto é expressivo o seu consumo de energia elétrica, conforme Eletrobrás (2014) a iluminação pública no Brasil corresponde aproximadamente a 3,0% do consumo total de energia elétrica do país.

. Portanto, a necessidade de pesquisar novas formas de iluminação pública, além da usual que utilizam lâmpadas a vapor de descarga, fluorescente compacta etc (CAMPONOGARA, 2012).

A iluminação pública a LED, diodos emissores de luz, do inglês (*Lighting Emitting Diode*), é um grande atrativo, pois segundo algumas pesquisas (Pinto, 2012), estes chegam a ser até 80% mais eficientes do que a iluminação a vapor de descarga.

Porém, os LEDs não podem ser conectados diretamente na rede elétrica, devido o dispositivo não suportar variações bruscas de tensão e corrente (BRITTO, 2009; CAMPONOGARA, 2012; PINTO, 2012).

Portanto é necessário um sistema que produza níveis de tensão e corrente aceitáveis para o dispositivo, nesse caso chamado de *driver* (BRITTO, 2009; CAMPONOGARA, 2012; PINTO, 2012).

O *driver* pode ser dividido em dois estágios de operação: o primeiro estágio é responsável por corrigir o fator de potência e o segundo por garantir a menor ondulação de tensão e corrente na carga (BRITTO, 2009; CAMPONOGARA, 2012; PINTO, 2012).

Grandes variações de tensão e corrente na carga afetam diretamente o tempo de vida útil do LED, manutenção do fluxo luminoso e tomando cuidado para nunca ultrapassar o limite de 20 % de variação, que pode ocasionar o efeito *flicker*. Que segundo Deckmann e Pomilio, o olho humano é capaz de perceber cintilação luminosa quando a fonte luminosa é submetida a flutuação de tensão bruscas de 20% da nominal (S.M.DECKMANN E J. A.POMILIO).

Todos os conversores serão projetados para operar com uma frequência de chaveamento de 45 kHz, valor esse escolhido devido ser um limiar para não ter a necessidade de se adequar a norma CISPR11 que determina os valores máximos admitidos para o ruído eletromagnético produzido pelas fontes chaveadas ( (POMILIO, 2007)).

Este trabalho faz um comparativo entre as topologias de conversores CC-CC não isolados, levando em consideração os esforços que cada topologia exerce em seus semicondutores, níveis máximos de tensão e corrente na carga e valores de componentes projetados.

Os resultados obtidos serão específicos para um determinado modelo de carga, utilizando o LED de potência da fabricante Philips, modelo LUXEON Rebel LXML-PWN1-0100 (PHILIPS).

O presente trabalho está disposto da seguinte maneira: O capítulo 2 apresenta a tecnologia LED dando ênfase no modelo de LED escolhido, visão geral do sistema para acionamento de uma luminária de LEDs, particularizando o *driver*.

Posteriormente, os conversores estudados, que são as topologias *Buck*, *Buck-Boost*, *Cuk*, *ZEPIC* e *ZETA*, justificando a escolha do modo de operação do conversor, definição de algumas premissas de projeto necessárias para o correto funcionamento do sistema e por fim serão descritas as cargas a serem acionadas.

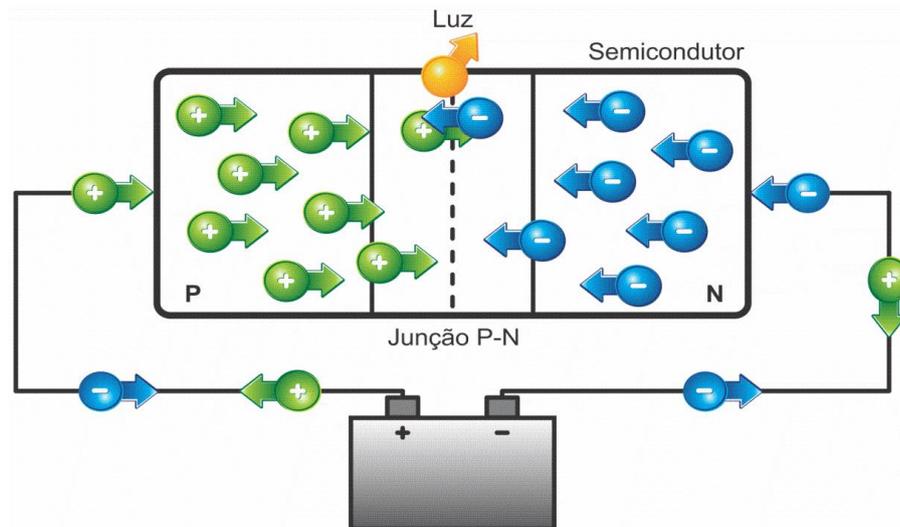
Os Capítulos 3, 4, 5, 6 e 7 são destinados ao projeto e simulação das topologias dos conversores. Serão descritos os seus modos de funcionamento, deduções matemáticas e resultados obtidos através de projeto e simulação.

O Capítulo 8 apresenta uma comparação entre os conversores, levando em consideração os esforços nos semicondutores (chave de potência e diodo), analisando também a ondulação de tensão e corrente que a carga é submetida. Por fim, será descrito o conversor que melhor atenda esses objetivos, para representar o estágio de controlador de potência da aplicação proposta.

## 2. DIODOS EMISSORES DE LUZ

Os LEDs são dispositivos que surgiram na década de 60, e desde então são muito utilizados na eletrônica, como por exemplo, em painéis luminosos, iluminação de emergência, embelezamento de ambientes externo e interno. Assim como os diodos convencionais, eles permitem a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido.

O processo de emissão de luz do LED ocorre através do fenômeno chamado eletroluminescência que é a emissão de luz quando ocorre a passagem da corrente elétrica através um determinado material P e um material N, como mostra a Figura 1. A principal característica desse dispositivo é a grande eficiência energética aliado com a alta durabilidade (CAMPONOGARA, 2012; NOVICKI & MARTINEZ, 2008; SIMÕES, 2012).



**Figura 1: Ilustração do processo de emissão de luz do LED.**  
 Fonte: (PINTO, 2012, p. 28).

Os LEDs originalmente não emitem comprimento de onda de luz branca. A luz branca pode ser obtida através da combinação de LEDs coloridos (vermelho, verde e azul), ou utilizar apenas um LED que emita um comprimento de onda referente ao azul e dopá-lo com a inserção de uma camada de fósforo na superfície (PINTO, 2012; CAMPONOGARA, 2012; NOVICKI & MARTINEZ, 2008; ALMEIDA, 2012).

Para o caso da inserção de fósforo na superfície de um LED azul segundo Rafael (2012, p.30), “quando uma parte da luz azul atravessa a camada de

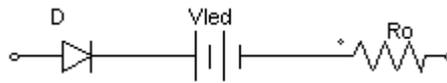
fósforo, torna-se amarela. O restante da luminosidade azulada é combinada com a luz amarela resultando em luz branca”. Com o avanço da tecnologia os LEDs que inicialmente era destinado a sistemas eletrônicos, foram aperfeiçoados para aplicações de maior potência, então, denotou-se LEDs de potência.

Em sistemas de iluminação pública, os LEDs de potência surgiram como uma alternativa moderna às atuais lâmpadas utilizadas, possuindo elevada vida útil, cerca de 50000 horas, baixo consumo quando comparado com as lâmpadas de vapor de sódio (HPS - high pressure sodium), baixa manutenção, alta eficiência luminosa e por apresentarem mais resistência a choques e vibrações (CAMPONOGARA, 2012; NOVICKI & MARTINEZ, 2008; PINTO, 2012; ALMEIDA, 2012).

Em contrapartida, como toda fonte luminosa alimentada por eletricidade, parte da energia entregue ao LED é transformada em luz e parte é transformada em calor. Os LEDs de potência dissipam muito calor devido trabalharem com potências elevadas cerca de 1 watt, fator determinante no seu funcionamento, pois pode interferir na intensidade da luz produzida ou até mesmo a queima do componente. Por isso há a necessidade da inserção de grandes dissipadores de calor (ALMEIDA, 2012; CAMPONOGARA, 2012; NOVICKI & MARTINEZ, 2008; PINTO, 2012).

No ramo da eletrônica é altamente recomendada a simulação de circuitos eletrônicos, pois reduz custos com possíveis erros de projeto e agiliza a produção. Para que a simulação seja a mais próxima da realidade é de suma importância a utilização de um modelo matemático que represente a carga a ser acionada (ALMEIDA, 2012; PINTO, 2012). Assim, segundo Almeida (2012), um modelo adequado para representar eletricamente o LED “É aproxima-lo como sendo uma fonte de tensão em série com uma resistência, sem permitir, no entanto, passagem de corrente no sentido negativo”.

O LED de potência que será utilizado nesse projeto é do fabricante Philips, modelo LUXEON Rebel LXML-PWN1-0100, que conforme o fabricante é alimentado com uma corrente média de 0,6 A. Esse modelo de LED possui uma tensão direta de 2,85 V e uma resistência série de 0,5166 $\Omega$ . O circuito que ilustra o modelo elétrico do LED é descrito na Figura 2 (SÁ JUNIOR, 2010; ALMEIDA, 2012).



**Figura 2: Modelo elétrico do LED.**  
**Fonte: Aatoria Própria.**

Aplicando a segunda lei de *Kirchoff* no circuito descrito na Figura 2, obtêm-se a representação matemática do LED que é descrita em (2.1).

$$V_{Led} = V_t + I_{Led} \cdot R_o \quad (2.1)$$

Onde:

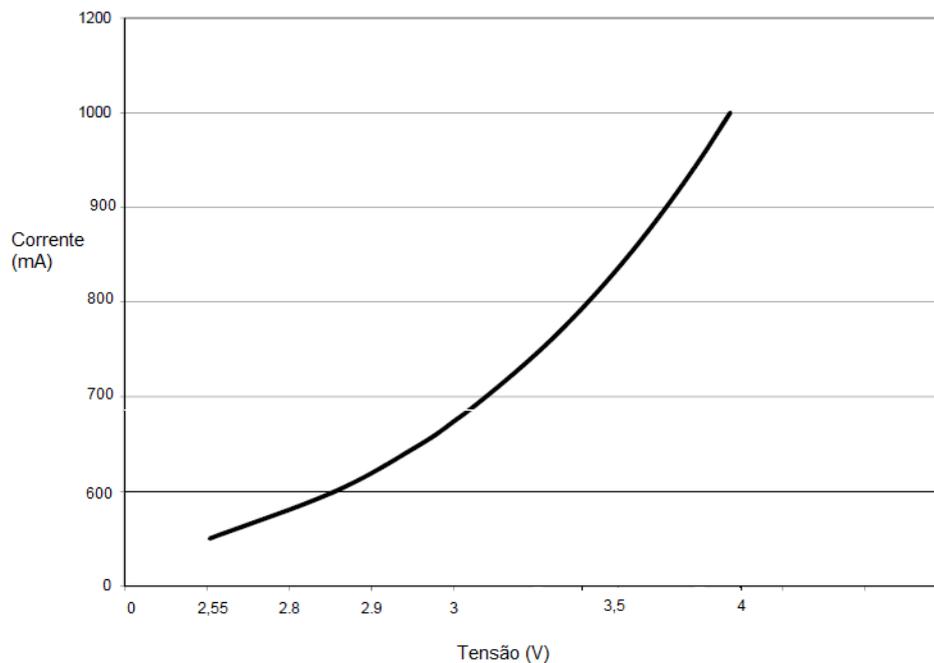
$V_t$  , é a tensão total aplicada no ramo;

$I_{Led}$  , corrente que atravessa o dispositivo;

$R_o$  , resistência intrínseca do dispositivo e;

$V_{Led}$ , tensão aplicada no componente.

A Figura 3 representa a curva tensão x corrente do LED utilizado para o projeto. Como pode ser observado, pequenas variações de tensão causam grandes variações de corrente, devido a relação  $V \times I$  não ser linear.



**Figura 3: Curva tensão vs corrente.**  
**Fonte : Adaptado de (PHILIPS).**

## 2.1 ACIONAMENTO DOS LEDS

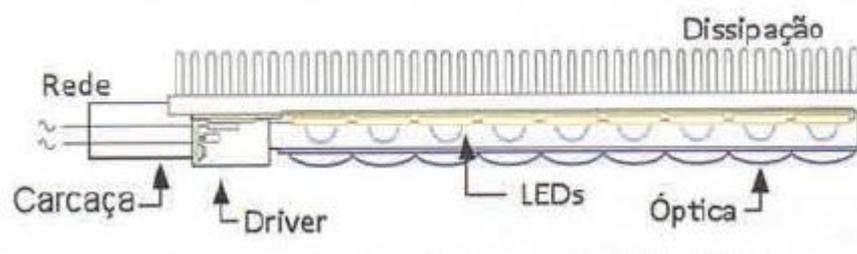
Conforme o autor Camponogara (2012, p.23), “O LED não pode ser conectado diretamente na rede. É necessário um sistema intermediário que processe a energia para padrões aceitáveis a esses dispositivos”.

Para o dimensionamento do circuito de acionamento (*DRIVER*) de um conjunto de LEDs é importante considerar o conjunto total, formado pelo circuito de acionamento mais lâmpada (CAMPONOGARA, 2012; BRITTO, 2009).

Esse sistema é responsável por manter as principais características dos LEDs, que são a elevada eficiência luminosa ( $lm/W$ ) e o longo tempo de vida útil, fatores que são alterados pela temperatura de junção e pela corrente elétrica que flui através do dispositivo (CAMPONOGARA, 2012; BRITTO, 2009).

Para manter as características do dispositivo é de suma importância o controle da corrente, pois, conforme o modelo elétrico do LED, Figura 2, a fonte de tensão em série com a resistência faz com que pequenas variações de tensão provoquem grandes variações de corrente (CAMPONOGARA, 2012; BRITTO, 2009).

O sistema a ser acionado consiste em uma luminária de LED para iluminação pública, conforme ilustra a Figura 4.



**Figura 4: Luminária de LED para iluminação pública,**  
**Fonte: (CLAUDIO R. B. S. RODRIGUES, p. 6)**

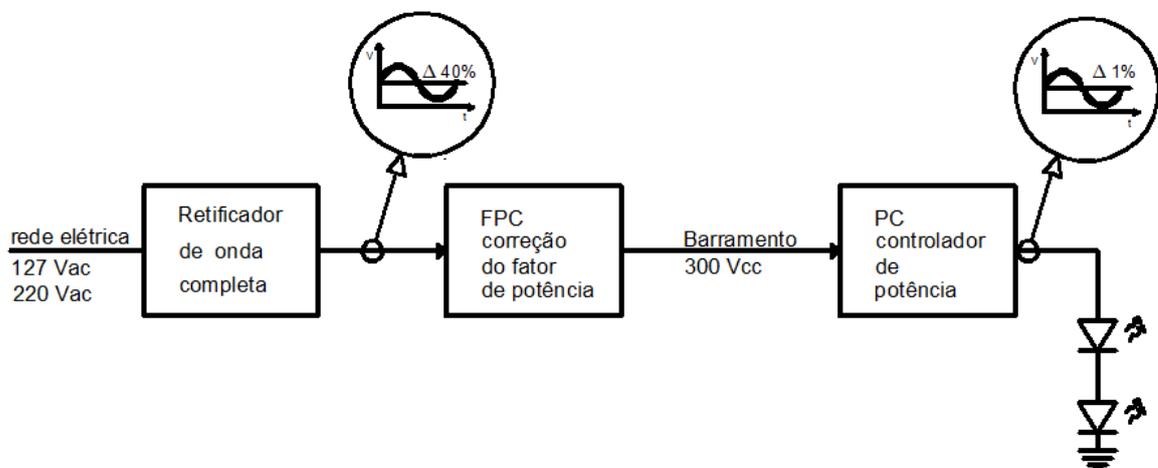
A luminária descrita na Figura 4 pode ser dividida em quatro partes, primeira: consiste na carcaça, destinada a conexões e esforços mecânicos, a segunda consiste no *driver* de acionamento que é responsável pelo acionamento elétrico dos LEDs onde será focado o devido trabalho, terceira os LEDs e quarta o dissipador de calor.

O *driver* deve ser conectado na rede elétrica CA (corrente alternada) e fornecer corrente CC (corrente contínua) para a carga. Portanto, é conveniente a

utilização de um retificador, nesse caso, utilizado o retificador de onda completa para retificar a tensão de entrada,  $127 V_{rms}$  ou  $220 V_{rms}$ , posteriormente, é conectado o primeiro conversor CC-CC, que tem por finalidade corrigir o fator de potência do sistema. Depois desse estágio é conectado através de um barramento de  $300V_{cc}$  o segundo conversor CC-CC, responsável pela adequação do *ripple* de tensão e corrente na carga.

O barramento de 300 V é utilizado devido ser um valor usual para aplicações com LEDs (ALMEIDA, 2012; CLAUDIO R. B. S. RODRIGUES; NOVICKI & MARTINEZ, 2008).

A implementação do estágio Correção do Fator de Potência (*Power Factor Correction, FPC*), soluciona o problema de correção do fator de potência, o segundo compromisso (garantir variação de corrente e tensão com níveis máximos de 1%) é garantido com a implementação de mais um conversor CC-CC chamado de Controlador de Potência (*Power Converter, PC*) que representa o estágio PC da Figura 5 (PINTO, 2012; CAMPONOGARA, 2012).



**Figura 5: Diagrama em blocos do driver,**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 2.2 CONVERSORES DE POTÊNCIA

Sistemas eletrônicos modernos exigem alta qualidade de energia, pequeno espaço físico, fontes de alimentação leves, confiáveis e eficientes. Reguladores de potência lineares, cujo princípio de funcionamento é baseado na

divisão de tensão são ineficientes e está limitada a saída com tensão menor do que a tensão de entrada. Além disso, sua densidade de potência é baixa, porque eles funcionam em baixa frequência, (50 ou 60 Hz) (RASHID, 2011).

Os conversores de potência são utilizados para sistemas que necessitam níveis mais elevados de energia, baixa ondulação de tensão e/ou corrente na carga. Utilizam chaves de potência comutadas que alternam seus estados ligado e desligado conforme uma frequência de chaveamento pré-determinada que segundo Mello (2011), pode chegar a centenas de quilohertz. No entanto há uma perda de potência no dispositivo. Segundo (Muhammad, 2011), quanto maior a frequência de operação são menores e mais leves os indutores de filtro e capacitores. Além disso, as características dinâmicas dos conversores melhoram com o aumento de frequência de operação.

Os conversores de potência CC-CC são amplamente utilizados em fontes de alimentação em corrente contínua. A entrada para esses conversores é muitas vezes uma tensão contínua CC não regulada, a qual é obtida através da retificação da tensão de linha, e, portanto, vai variar devido as alterações na magnitude de tensão de linha (RASHID, 2011; AHMED, 2000).

Suas principais características são:

- a. Converter uma entrada contínua CC não regulada para uma saída controlada CC a um nível de tensão desejado;
- b. Fornecer isolamento entre a fonte de entrada e a carga (isolamento nem sempre é necessário);
- c. Proteger o sistema fornecido e a fonte de entrada de interferência eletromagnética (EMI);
- d. Para satisfazer diversos padrões internacional e nacional (RASHID, 2011; HART, 2001).

Os conversores de potência podem ser divididos em ativos e passivos (CAMPONOGARA, 2012).

As topologias passivas não possuem componentes ativos e malha de controle. No entanto as topologias passivas tornam-se inviáveis para aplicações com LED, já que certos dispositivos do *driver* trabalhando em alta frequência possuem menor espaço físico (CAMPONOGARA, 2012).

As topologias ativas são caracterizadas por possuírem componentes ativos e/ou malha de controle o qual garante que a corrente entregue a carga, vai

estar dentro dos limites projetados, outra vantagem é a redução dos componentes utilizados, devido a frequência de trabalho ser maior que a da rede.

As topologias ativas podem ser divididas em Estágio único (presença de apenas um conversor) e duplo estágio (quando há dois conversores em série) (CAMPONOGARA, 2012).

O presente trabalho faz uso da topologia de duplo estágio, o qual processa a energia sem causar distorções na corrente de entrada, possibilidade de ação de controle mais rápida (quando utilizado malha de controle) e segundo Camponogara (2012, p.31), quando utiliza o segundo conversor é possível diminuir a capacitância de saída do primeiro estágio (CAMPONOGARA, 2012; CLAUDIO R. B. S. RODRIGUES).

Com a diminuição da capacitância é possível aumentar a eficiência do sistema e aproxima-lo cada vez mais da vida útil do LED (CAMPONOGARA, 2012).

Os conversores estudados nesse trabalho são topologias não isoladas descritas na Figura 6, devido demandar um espaço físico menor e rendimento maior quando comparados com os isolados (CAMPONOGARA, 2012).

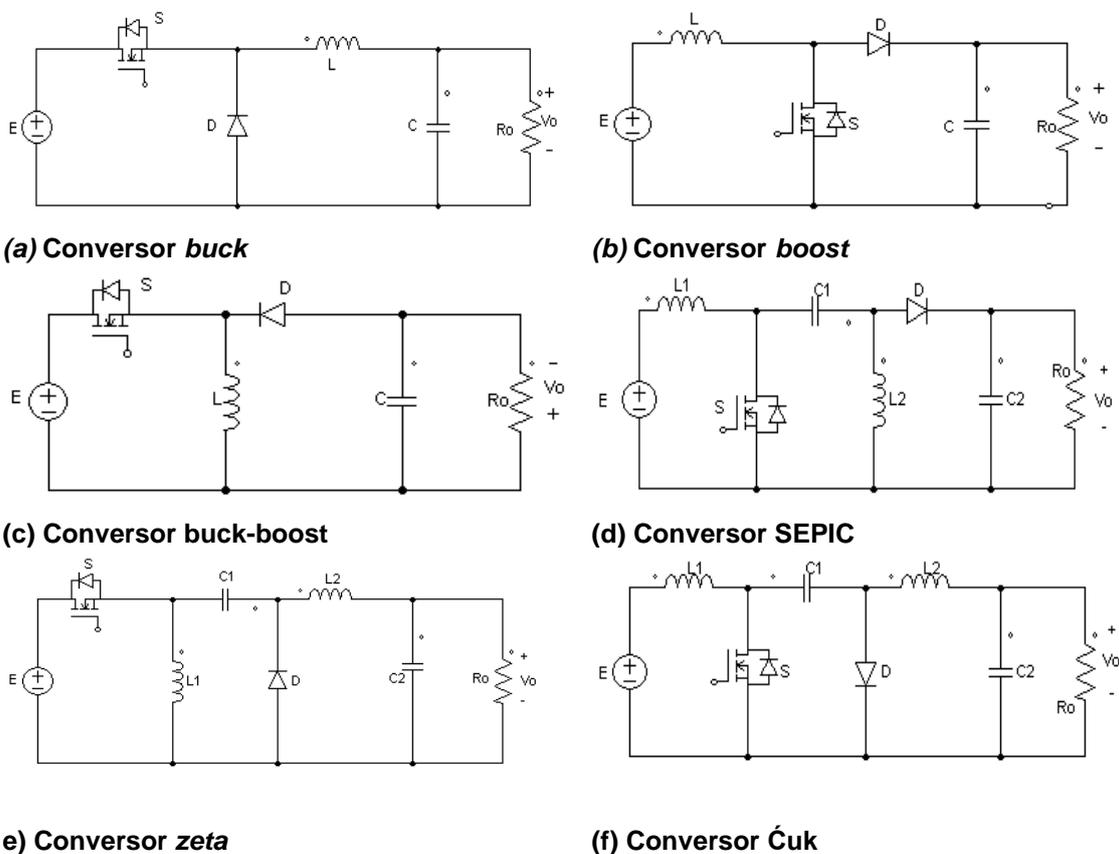


Figura 6: Topologias de conversores CC-CC.  
Fonte: Adaptado de Barbi, Martins (2006, p. 4).

## 2.3 CARGAS A SEREM ACIONADAS

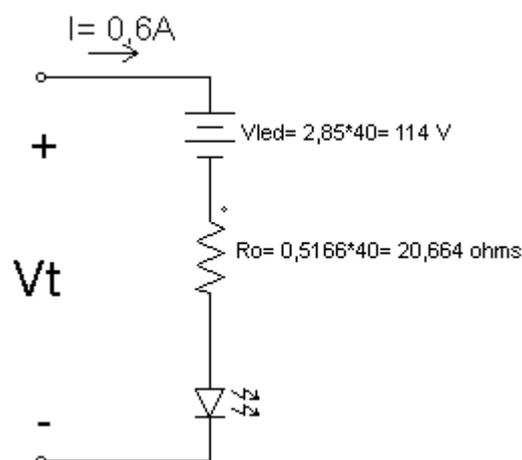
O estudo analisa as topologias de conversores CC-CC não isolados levando em consideração se as topologias são capazes de permitir uma variação máxima de tensão e corrente na carga de 1% dos seus valores médios.

Será analisado os esforços que cada topologia exerce nos seus semicondutores, comparação entre valores de componentes projetados e qual o arranjo de carga é mais adequado para aplicação, no ponto de vista dos esforços submetidos nos semicondutores.

A carga que o conversor terá que acionar se resume em dois modelos, Projeto 1 e Projeto 2. Para ambos os modelos, são utilizados o mesmo modelo de LED, porém o arranjo da ligação elétrica é alterado.

Este arranjo foi proposto com o intuito de substituir as atuais luminárias de iluminação pública, que segundo (COPEL DISTRIBUIÇÃO, 2012), no Paraná, são normalmente utilizadas lâmpadas HPS de 250W e 400 W para iluminação pública. No entanto o arranjo de 75W de LEDs é equivalente ao mesmo nível de iluminação que uma luminária HPS de 250W (SINOCO).

Projeto 1: O primeiro arranjo de carga consiste em um modelo de 40 LEDs ligados eletricamente em série conforme ilustra a Figura 7.



**Figura 7: Arranjo de LEDs para o projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para o correto funcionamento do sistema é necessário garantir uma corrente média na carga de 0,6 A, descrito no *data sheet* do componente e conforme

a análise de malhas do circuito da Figura 7, uma tensão total no ramo  $V_t$  igual a 126,3984 V (PHILIPS).

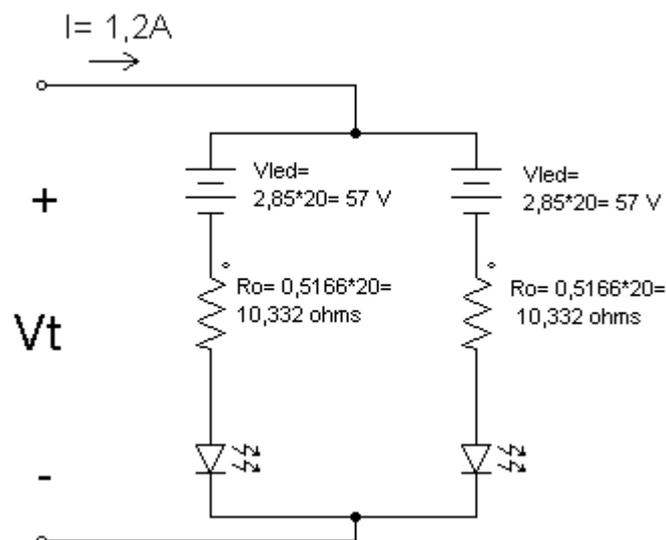
A variação máxima de tensão e corrente admitida na carga será de 1% da tensão e corrente média na carga, para garantir uma boa qualidade de fluxo luminoso do LED, e evitar o efeito *flicker* que nada mais é que a percepção do olho humano para variação de intensidade luminosa (S.M.DECKMANN E J. A.POMILIO).

A Tabela 1 informa as grandezas elétricas que o conversor escolhido terá que atender para o correto funcionamento dos LEDs, sendo que esses parâmetros são exigidos devido à configuração da carga, nesse caso os 40 LEDs ligados em série.

**Tabela 1: Parâmetros elétricos para o projeto 1.**

Parâmetros	Simbologia	Valor
Tensão total no ramo	$V_t$	126,3984 V
Resistência série total dos LEDs	$R_{LEDTotal}$	20,664 $\Omega$
Corrente no ramo	$I$	0,6 A
Tensão série dos LEDs	$V_{LED}$	114 V

Projeto 2: O segundo projeto corresponde na ligação de dois vetores em paralelo, cada um com 20 LEDs em série, como indica a Figura 8.



**Figura 8: Arranjo de LEDs para o projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

Para o correto funcionamento do sistema é necessário garantir uma corrente média na carga de 0,6 A em cada ramo, totalizando uma corrente total na carga de 1,2 A e conforme a análise de malhas do circuito da Figura 8, uma tensão total no ramo  $V_t$  igual a 63,1992 V com variação máxima de 1%, já justificado no projeto 1.

A Tabela 2 relaciona as grandezas elétricas da carga que o conversor escolhido terá que atender para o correto funcionamento do sistema, lembrando que esses parâmetros são exigidos devido a configuração da carga, nesse caso dois vetores em paralelo de 20 LEDs.

**Tabela 2: Parâmetros elétricos para o projeto 2.**

Parâmetros	Simbologia	Valor
Tensão total nos ramo	$V_t$	63,1992 V
Resistência série total por ramo	$R_{LEDTotal}$	10,332 $\Omega$
Corrente total da carga	$I$	1,2 A
Tensão série dos LEDs por ramo	$V_{LED}$	57 V

## 2.4 PREMISSAS DE PROJETO

Para realização do estudo e projeto dos conversores é necessário definir algumas premissas, como:

1. Os conversores e a carga são ideais ;
2. Rendimento 100%.
3. Os circuitos operam em regime permanente;
4. No período de comutação  $T$ , a chave de potência estará fechada em  $DT$  e aberta em  $(1-D)T$ , onde  $D$  é a razão cíclica.

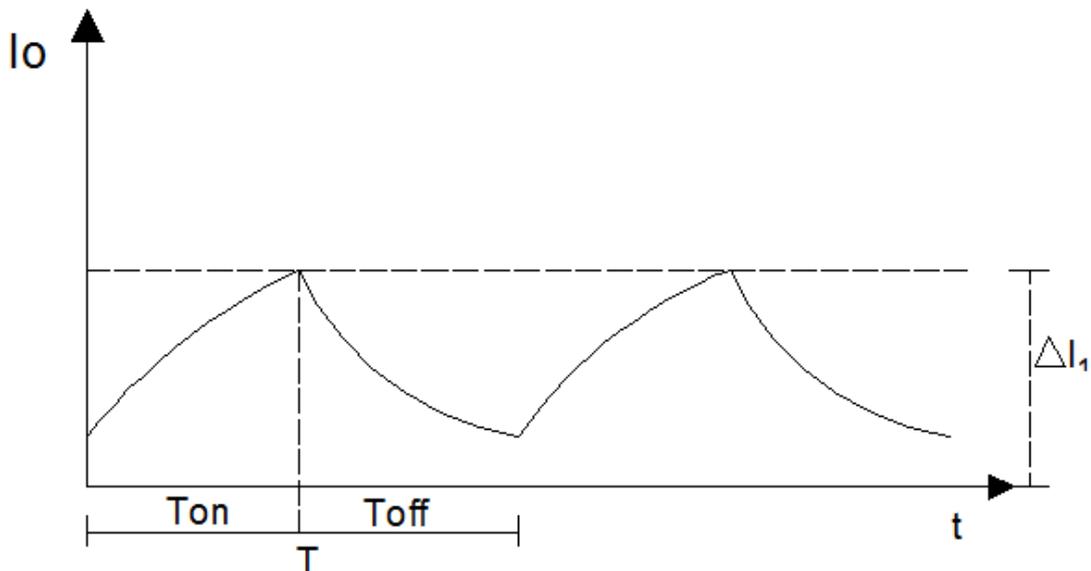
A ondulação da tensão nos capacitores de saída será admitida de no máximo 1 % da tensão média aplicada na carga. Essa medida foi tomada devido a necessidade do controle de variação de tensão e corrente na carga.

**Tabela 3: Premissas de projeto para os conversores**

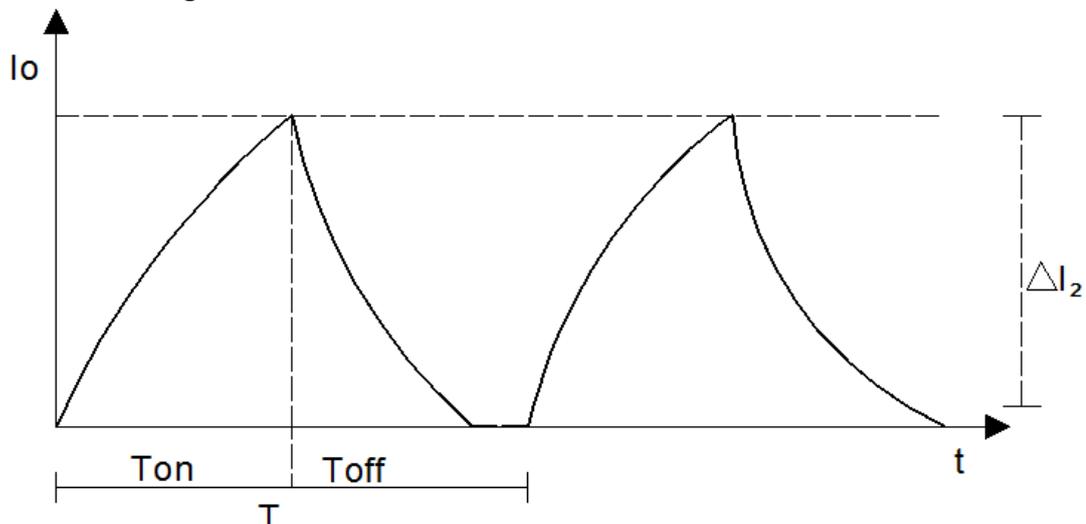
Parâmetros	Simbologia	Valor
Tensão de entrada	$V_E$	300 V
Tensão de saída	$V_o$	Projeto 1 = 126,3984 V Projeto 2 = 63,1992 V
Frequência de chaveamento	$F$	45Khz
Ondulação da tensão no capacitor de saída	$\Delta V_C$	1%

Os conversores operando no modo de condução contínua (CCM), possui um menor pico de corrente na carga quando comparado com o modo de condução descontínua (DCM), as formas de onda da corrente na carga de ambos os modos de condução estão representadas na Figura 9 (CAMPONOVARA, 2012; SIMÕES, 2012).

O autor Camponogara (2012, p.40) ressalta que os conversores operando em CCM apresentam uma redução do valor da capacitância do capacitor de saída, possibilitando uma ação mais rápida do controlador e otimizando o projeto, devido os capacitores com capacitância elevada diminuir a vida útil do sistema (AHMED, 2000; ALMEIDA, 2012; CAMPONOVARA, 2012; CLAUDIO R. B. S. RODRIGUES).



(a) Corrente de carga no CCM.



(b) Corrente de carga DCM.

Figura 9: Formas de onda da corrente na carga.

Fonte: Adaptado de (BARBI; MARTINS, 2006, p. 21)

Onde:

$T_{on}$ = tempo em que a chave S está conduzindo e

$T_{off}$ = tempo em que a chave S está bloqueada.

Realizando uma análise preliminar dos conversores determina-se que o conversor *boost* não é um candidato para assumir o estágio PC, devido sua característica de apenas elevar a tensão de saída (HART, 2001). O estágio PC necessita de um conversor que rebaixe a tensão de entrada, já que foi considerado um barramento de entrada de  $300V_{cc}$ . O conversor escolhido terá que fornecer para a carga do projeto 1 uma tensão de saída de 126,3984V e 63,1992 V para o segundo projeto.

A análise das outras topologias estão apresentadas nos capítulos 3 conversor *buck*, capítulo 4 conversor *buck-boost*, capítulo 5 conversor *Cuk*, capítulo 6 conversor *SEPIC* e capítulo 7 conversor *ZETA*.

### 3 CONVERSOR CC-CC *BUCK*

O conversor CC-CC *buck*, conhecido também como conversor abaixador de tensão, fornece um valor médio de tensão de saída inferior ao valor médio da tensão de entrada. A Figura 10 apresenta a topologia do conversor *buck*. Observe-se que o mesmo é um conversor de segunda ordem, por apresentar dois elementos acumuladores de energia, um indutor e um capacitor. Seu circuito ainda é composto por uma chave passiva (o diodo  $D$ ) e por uma chave ativa ( $S$ ), que na prática pode ser um MOSFET ou outra chave semicondutora de potência.

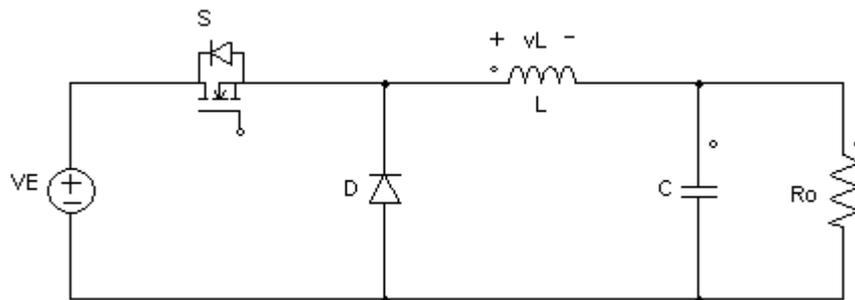


Figura 10: Conversor CC-CC *buck*.  
Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR *BUCK* COM A CHAVE $S$ FECHADA

A Figura 11, representa o funcionamento do conversor *buck* quando a chave  $S$  é fechada. Neste momento o diodo  $D$  é polarizado inversamente e impede a condução da corrente elétrica, desse modo, a fonte de tensão  $V_E$  fornece energia diretamente ao indutor  $L$ , capacitor  $C$  e para a carga  $R_o$ .

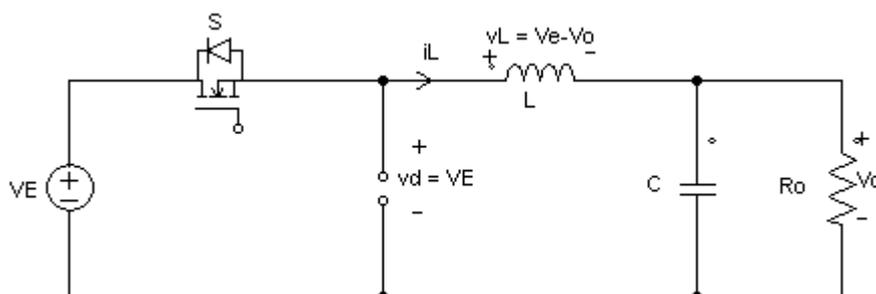


Figura 11: Conversor *buck* operando com chave  $S$  fechada.  
Fonte: Autoria própria.

A análise e as deduções matemáticas descritas a seguir tomam por base a análise do autor Hart (2001, p.206).

Realizando a análise de malhas do circuito, defini-se a tensão no indutor, dada por (3.1).

$$V_L = V_E - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.1)$$

Reorganizando (3.1) obtêm-se a taxa de variação da corrente no indutor na primeira etapa, dada por (3.2).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_E - V_o}{L} \quad (3.2)$$

Portanto, a forma de onda da corrente no indutor será uma rampa, devido à (3.2) ser uma derivada de primeira ordem, conforme ilustra a Figura 11.

A variação da corrente no indutor quando a chave está fechada é calculada modificando (3.2), conforme (3.3) e (3.4).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_E - V_o}{L} \quad (3.3)$$

$$\Delta i_{L(fechado)} = \left( \frac{V_E - V_o}{L} \right) DT \quad (3.4)$$

Considerando  $D$  a razão cíclica e  $T$  o período de comutação, multiplicando os dois tem-se o tempo em que a chave  $S$  permanece fechada. Ainda, pela análise do circuito da Figura 11 é possível determinar a corrente no capacitor, dada por (3.5).

$$-i_L + i_C + i_o = 0 \quad (3.5)$$

Considerando (3.6).

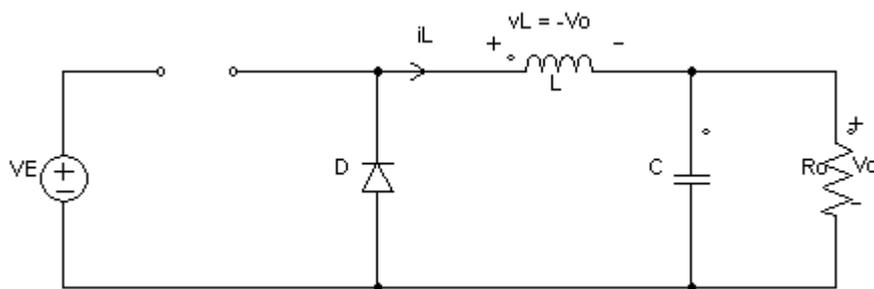
$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (3.6)$$

Obtém-se (3.7).

$$i_c = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (3.7)$$

### 3.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR *BUCK* COM A CHAVE *S* ABERTA

Quando a chave *S* abre, conforme ilustra a Figura 12, o diodo *D* é polarizado diretamente, permitindo a passagem da corrente elétrica.



**Figura 12: Conversor *buck* operando com chave *S* aberta.**  
**Fonte: Adaptado de (HART, 2001, p. 204).**

A tensão no indutor é definida através da análise de malhas conforme descreve (3.8), que será o mesmo valor que a tensão de saída, porém com polaridade inversa (3.9).

$$v_L + V_o = 0 \quad (3.8)$$

$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.9)$$

Reorganizando (3.9) obtém-se (3.10):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (3.10)$$

Pela análise de (3.10), observa-se que a derivada da corrente no indutor é uma constante negativa, fazendo que a corrente diminua linearmente em forma de rampa, devido à derivada ser de primeira ordem, conforme ilustra a Fig 12.

A variação da corrente no indutor quando a chave está aberta é descrita por (3.11) e (3.12).

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \quad (3.11)$$

$$\Delta i_{L (aberto)} = \frac{-V_o}{L}(1-D)T \quad (3.12)$$

### 3.3 GANHO ESTÁTICO DO CONVERSOR *BUCK*

Para garantir que o conversor opere no modo CCM é necessário que a variação da corrente no indutor em um período seja zero (3.13) e a corrente nunca atinja um valor nulo. (HART, 2001, p. 207).

$$\Delta i_{L (aberto)} + \Delta i_{L (fechado)} = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{-V_o}{L}(1-D)T + \left(\frac{V_E - V_o}{L}\right)DT = 0 \quad (3.14)$$

Reorganizando (3.14) e isolando  $D$ , obtém-se (3.15):

$$D = \frac{V_o}{V_E} \quad (3.15)$$

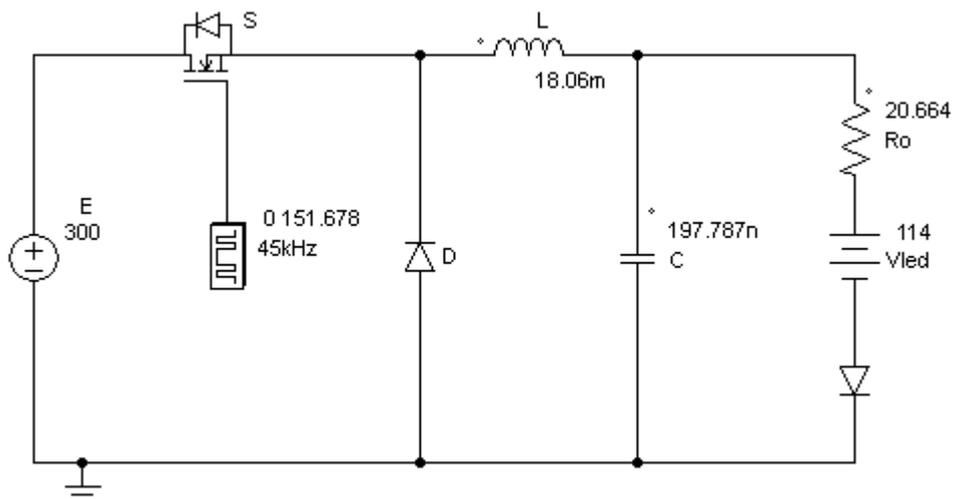
Isolando a tensão de saída obtém-se (3.16):

$$V_o = V_E D \quad (3.16)$$

Analisando (3.16), observa-se que a tensão de saída só depende da entrada e da razão cíclica. A tensão de saída do conversor *buck* pode ser igual ou menor que a tensão de entrada já que a razão cíclica pode variar de 0 a 1. Se a tensão de entrada oscila a tensão de saída pode ser regulada ajustando a razão cíclica através de malha de controle.

### 3.5 PROJETO DO CONVERSOR *BUCK* UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE

Essa seção apresenta o projeto e simulação do conversor *buck*, acionando uma matriz de 40 LEDs de potência ligados em série, que conforme o modelo elétrico do LED apresentado no Capítulo 2, resume-se na carga demonstrada na Figura 13.



**Figura 13: Conversor *Buck* acionando uma matriz de 40 LEDs de potência em série.**  
Fonte: Autoria própria.

Considerando as premissas de projeto descritas na Tabela 1 do Capítulo 2, é realizado o projeto do conversor CC-CC *buck* descrito na Figura 13.

A análise e as deduções matemáticas descritas a seguir são baseadas nos autores (HART, 2001; BARBI; MARTINS, 2006).

### 3.5.1 Definição do ganho estático

O ganho estático do conversor *buck* é definido através de (3.17).

$$D = \frac{V_o}{V_i} = 0,421 \quad (3.17)$$

### 3.5.2 Dimensionamento do indutor

A corrente média no indutor deve ser igual à corrente média na resistência da carga, devido a corrente média no capacitor ser nula quando operando em regime permanente, conforme indica (3.18) e (3.19).

$$I_o = \frac{V_o}{R} = 0,6 \text{ A} \quad (3.18)$$

$$I_{L\text{méd}} = I_o = 0,6 \text{ A} \quad (3.19)$$

Os valores de corrente máxima e mínima no indutor podem ser calculados estipulando a máxima variação de corrente no indutor que foi admitida 15% da corrente média no indutor. Este valor foi escolhido devido exercer valores aceitáveis, para os esforços nos semicondutores e indutores com valores não tão elevados a ponto de inviabilizar o projeto, conforme indicam (3.20) e (3.21).

$$\Delta iL\% = 15\% \quad (3.20)$$

$$\Delta iL = \Delta iL\% I_L = 0,09 \text{ A} \quad (3.21)$$

O indutor é calculado através de (3.22):

$$L = \frac{(V_E - V_o)DT}{\Delta iL\% i_o} = 18,06 \text{ mH} \quad (3.22)$$

### 3.5.3 Dimensionamento do capacitor.

A variação de tensão na carga ou *ripple* é calculada através de (3.23), em que é compreendida como sendo a área da forma de onda da corrente no capacitor. Geralmente para aplicações em LEDs o *ripple* é fornecido como uma especificação de projeto.

$$C = \frac{1 - D}{8 \cdot L \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f^2} = 197,787 \text{ nF} \quad (3.23)$$

### 3.5.4 Dimensionamento da chave S e do diodo D

A máxima tensão que a chave S e o diodo D devem suportar está descrita na Eq. (3.30).

$$V_{Spk} = V_{Dpk} = V_E = 300V \quad (3.30)$$

A corrente média que circula no indutor é a mesma que a corrente média na carga devido a corrente do capacitor ser nula quando operando em regime permanente.

Analisando o circuito da Figura 10, deduz-se que a corrente média na chave S e no diodo D são calculadas utilizando as Equações (3.31), (3.32).

$$I_{Sméd} = I_{Lméd} D = 0,253 \text{ A} \quad (3.31)$$

$$I_{Dméd} = I_{Lméd} (1 - D) = 0,347 \text{ A} \quad (3.32)$$

E uma corrente máxima de (3.33).

$$I_{Smáx} = I_{Dmáx} = I_{Lmáx} = I_{Lméd} + \frac{\Delta i_L}{2} = 0,645 \text{ A} \quad (3.33)$$

A

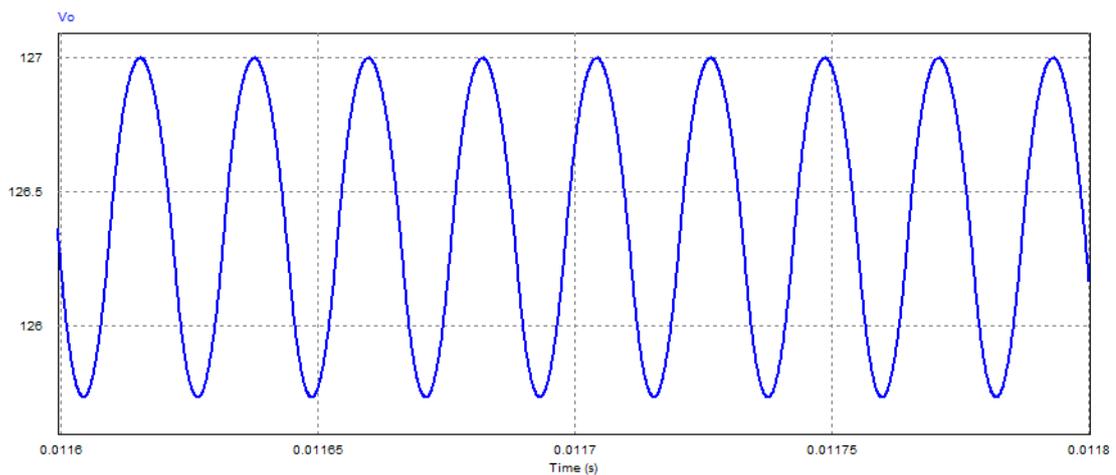
Tabela 4, descreve os valores projetados dos componentes do conversor *buck* para o acionamento de uma matriz de 40 LEDs ligados em série.

**Tabela 4: Parâmetros do conversor *buck*.**

D	0,421
$I_{Lméd}$	0,6 A
$I_{Lpk}$	0,645 A
$I_{Lmin}$	0,555 A
L	18,06 mH
$V_{Cméd}$	126,3984 V
$V_{Cmin}$	125,7664 V
$V_{Cmáx}$	127,03 V
C	197,787 nF
$I_{Dméd}$	0,347 A
$I_{Sméd}$	0,253 A
$I_{Dmáx} = I_{Smáx}$	0,645 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	300 V

### 3.5.5 Resultados de simulação

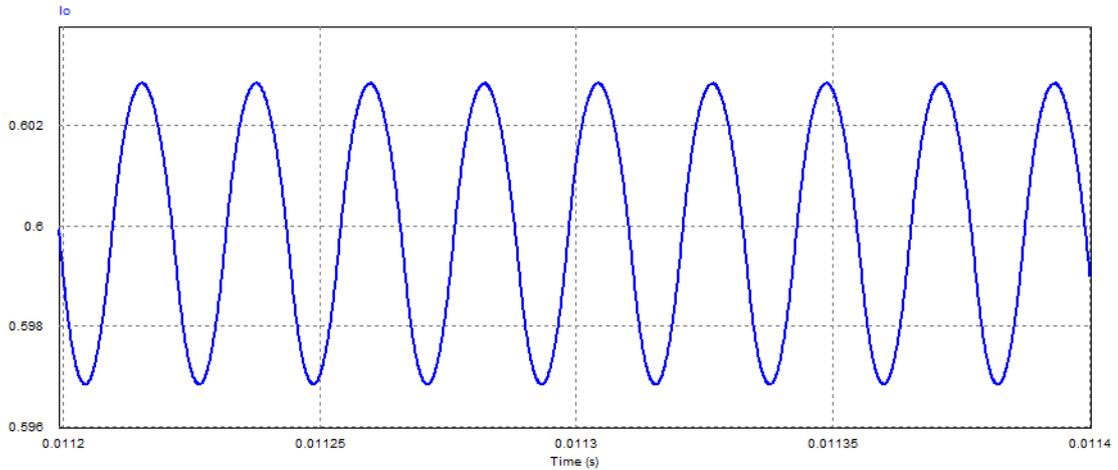
As formas de onda da Figura 14 e Figura 15 representam as formas de onda da tensão e da corrente na carga e as Tabela 5 e Tabela 6 seus respectivos valores. nesse caso foi considerada uma matriz de 40 LEDs de potência ligados em série, tal qual já descrito no Capítulo 2.



**Figura 14: Forma de onda da tensão aplicada na carga do conversor *buck*, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 5: Valores da tensão aplicada na carga, projeto 1.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	126,398V	126,397V
Tensão mínima	125,766V	125,732V
Tensão máxima	127,030V	126,997V



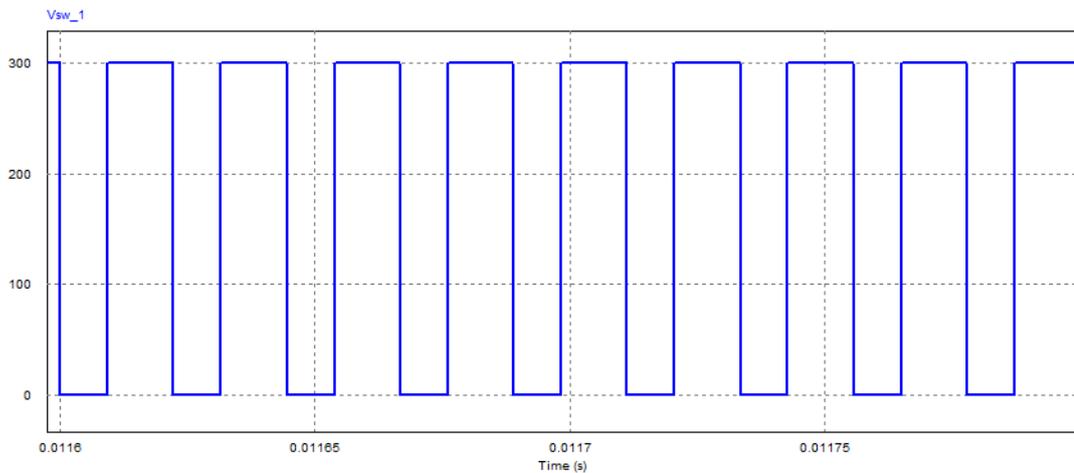
**Figura 15: Forma de onda da corrente aplicada na carga do conversor *buck*, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 6: Conversor *buck*, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,6 A	0,600 A
Corrente mínima	0.597 A	0,596 A
Corrente máxima	0,603 A	0,6029 A

Como pode ser observado na Figura 14 e Figura 15, o conversor *buck*, atendeu as características de acionamento da carga, mantendo a ondulação de tensão e corrente na carga dentro dos níveis projetados, conforme mostra a Tabela 5 e Tabela 6.

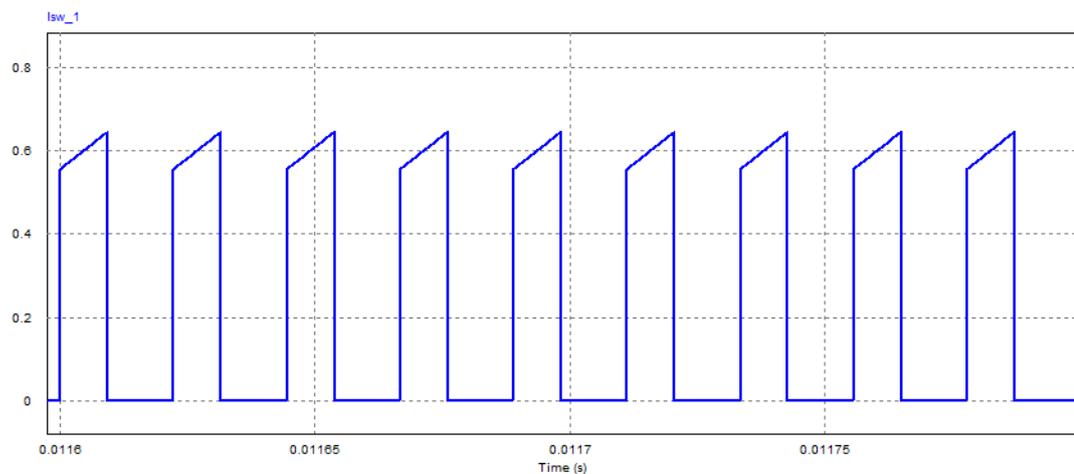
Os esforços de tensão e corrente nos semicondutores são representados nas Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19, que representam as formas de onda aplicadas na chave *S* e no diodo *D*. Os valores dos esforços que ambas as chaves são submetidas estão descritos nas Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.



**Figura 16: Conversor *buck*, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 7: Conversor *buck*, valor máximo de tensão aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	300V	300V

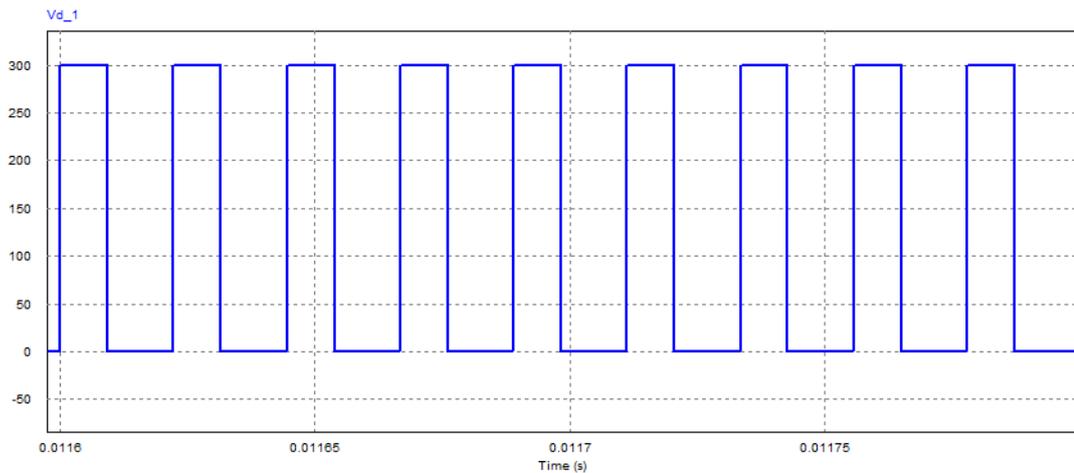


**Figura 17: Conversor *buck*, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 8: Conversor *buck*, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,253 A	0,255 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	0,645 A	0,645 A

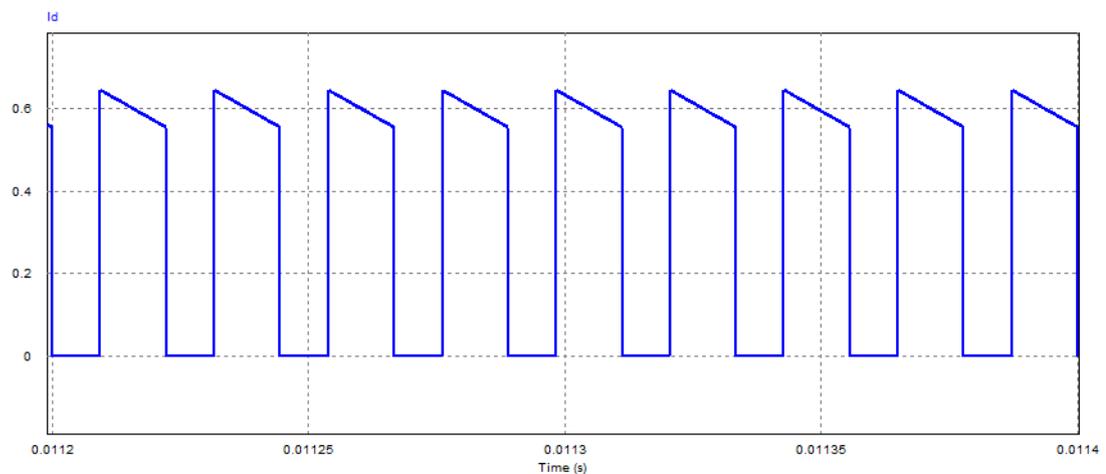
A Figura 18 e Figura 19 representam as formas de onda da tensão e da corrente no diodo.



**Figura 18: Conversor *buck*, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1.**  
**Fonte: autoria própria.**

**Tabela 9: Conversor *buck*, valores de tensão aplicado no diodo projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	300V	300V



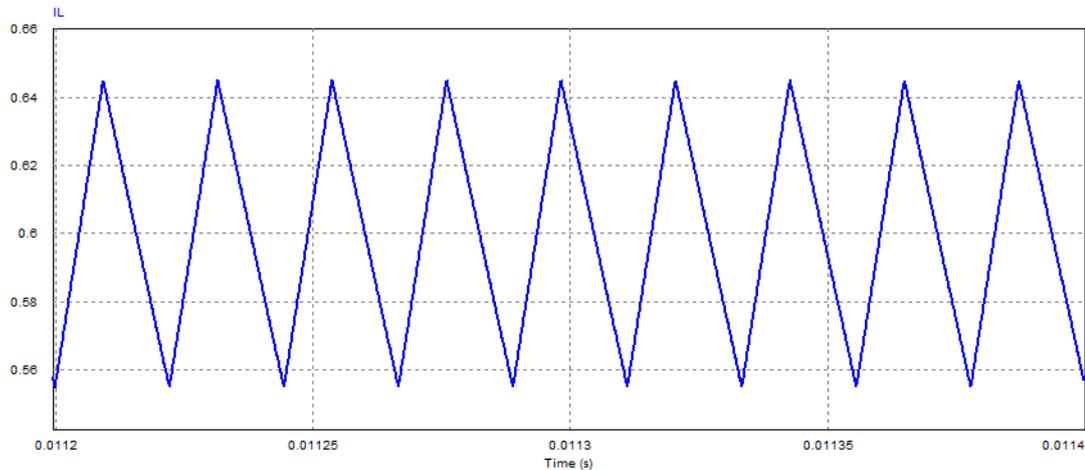
**Figura 19: Conversor *buck*, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 10: Conversor *buck*, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,347 A	0,3487 A
Corrente mínima	0,645 A	0,645 A
Corrente máxima	0	0

A Figura 20, representa a forma de onda da corrente no indutor, necessária para provar que o conversor está operando em modo de condução contínua. que conforme a mesma nota-se que o indutor carrega e descarrega em um

período sem a existência de um tempo morto com valor nulo, o que caracteriza o modo de operação.



**Figura 20: Conversor *buck*, forma de onda da corrente no indutor, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19 com suas respectivas tabelas de valores projetados e simulados, os esforços máximos nos semicondutores são os mesmos para a chave *S* e o diodo *D*.

Os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 300V e uma corrente máxima de 0,645 A, que conforme descrito no Capítulo 1, será uma das condições para a escolha do conversor para representar o estágio PC.

Dessa maneira, conforme o simulado o conversor CC-CC *buck* deve fornecer uma potência média de 75,83 W com uma variação máxima de potência de 76,6 W, o que fica especificado dentro das condições de projeto que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga.

### 3.6 PROJETO DO CONVERSOR BUCK UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS EM SÉRIE

O projeto 2, apresentado na seção 3.6 consiste no acionamento da segunda configuração da carga da luminária, ou seja o conversor *buck* acionando uma matriz de 40 LEDs de potência ligados em série, que conforme o modelo

elétrico do LED apresentado no Capítulo 2, resume-se na carga demonstrada na Figura 21.

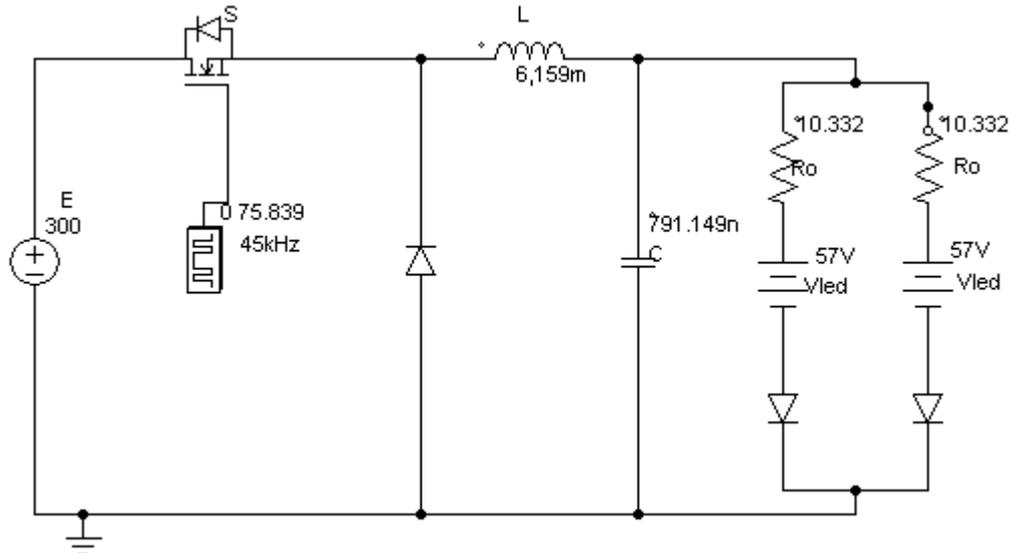


Figura 21: Conversor *buck* acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada.  
Fonte: Autoria própria.

Realizando o projeto do conversor CC-CC *buck*, conforme a seção anterior, porém para a carga da Tabela 2 do Capítulo 2, obtém-se os parâmetros descritos na Tabela 11.

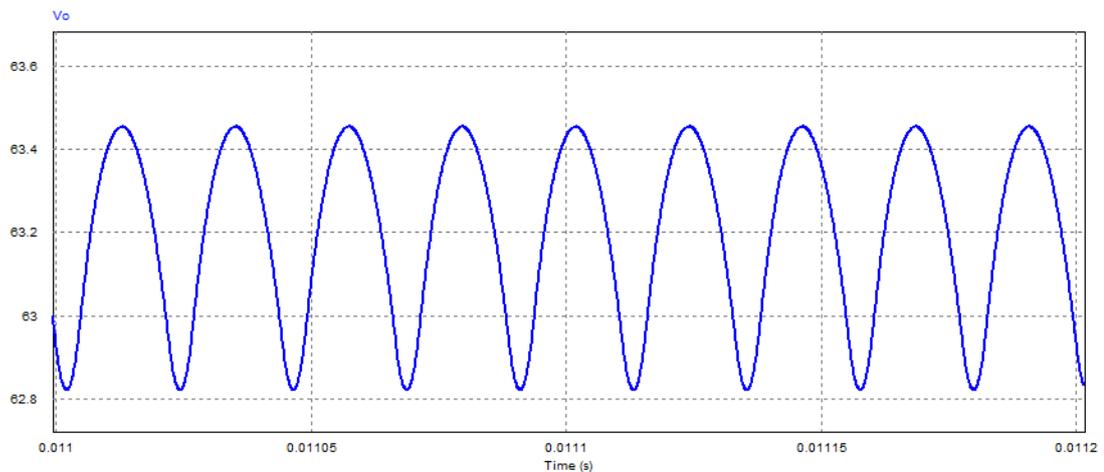
Tabela 11: Parâmetros do conversor *buck* para o projeto 2.

D	0,211
$I_{Lméd}$	1,2 A
$I_{Lpk}$	1,29 A
$I_{Lmín}$	1,11 A
L	6,159 mH
$V_{Cméd}$	63,2 V
$V_{Cmín}$	62,883 V
$V_{Cmáx}$	63,515 V
C	791,149 nF
$I_{Sméd}$	0,253 A
$I_{Smáx}$	1,29 A
$I_{Dméd}$	0,947 A
$I_{Dmáx}$	1,29 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	300 V

### 3.6.1 Resultados de simulação

As formas de onda das Figura 23 e Figura 24, representam as formas de onda da tensão e da corrente aplicadas na carga e as Tabela 12 e Tabela 13, seus respectivos valores.

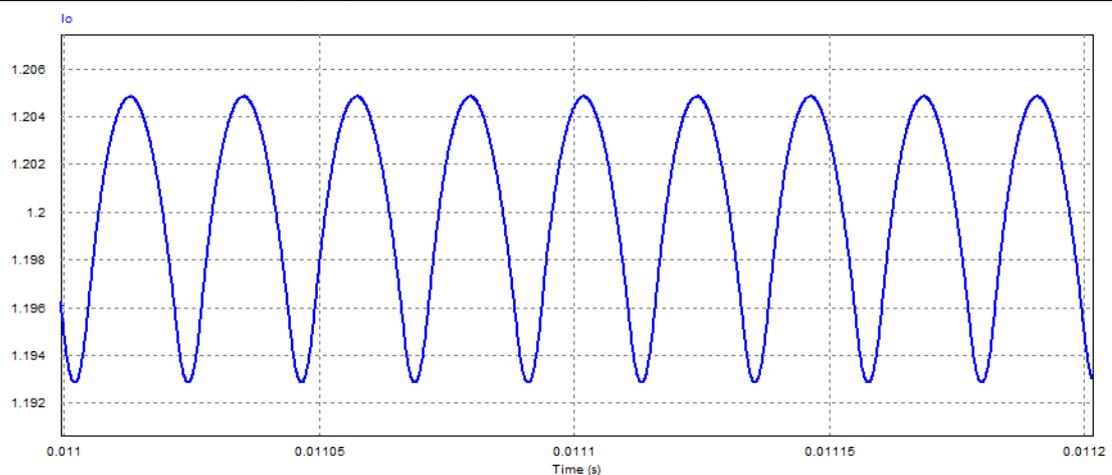
Nesse caso foi considerado dois vetores de 20 LEDs ligados em serie, tal qual, já descrito no Capítulo 2.



**Figura 22: Conversor *buck*, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 12: Conversor *buck*, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	63,199V	63,197V
Tensão mínima	62,883V	62,8227V
Tensão máxima	63,515V	63,4543V



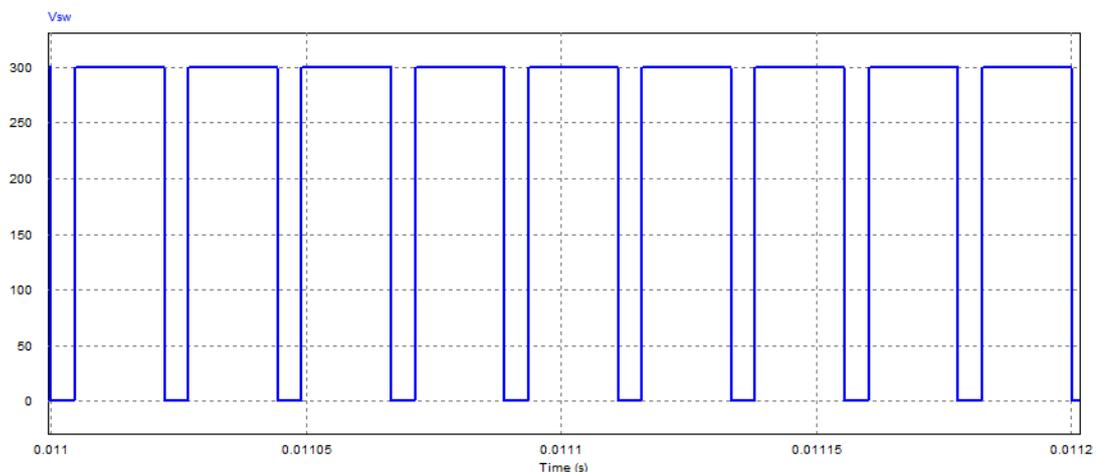
**Figura 23: Conversor *buck*, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 13: Conversor buck, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	1,2A	1,2 A
Corrente mínima	1,194A	1,1928 A
Corrente máxima	1,206A	1,2048 A

Como pode ser observado na Figura 22 e Figura 23, o conversor *buck*, acionando uma carga de dois vetores de 20 LEDs cada, conseguiu atender as características de acionamento da carga, mantendo a ondulação de tensão e corrente na carga dentro dos níveis projetados, conforme mostra as Tabela 12 e Tabela 13.

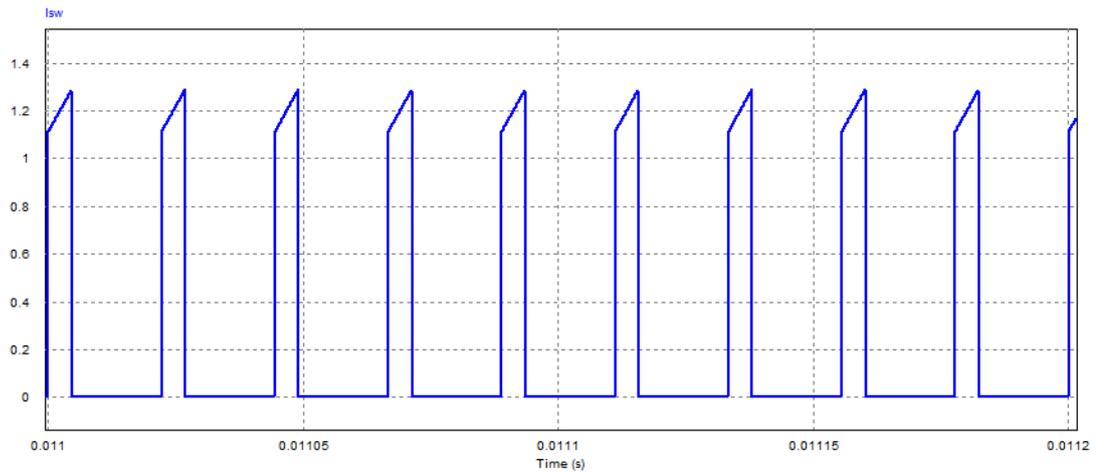
Os esforços de tensão e corrente nos semicondutores são representados nas Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27, que representam as formas de onda aplicadas na chave *S*, e no diodo *D*, os valores dos esforços que ambas as chaves estão submetidas são descritos nas Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.



**Figura 24: Conversor buck, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 14: Conversor buck, valores de tensão aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	300V	300V

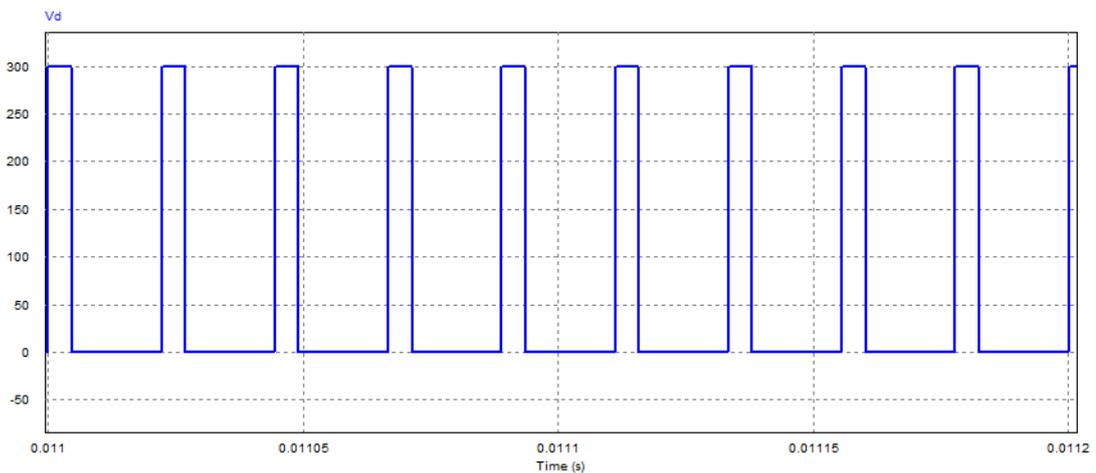


**Figura 25: Conversor *buck*, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2.**  
 Fonte: Autoria própria.

**Tabela 15: Conversor *buck*, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,253 A	0,2559 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,29 A	1,29 A

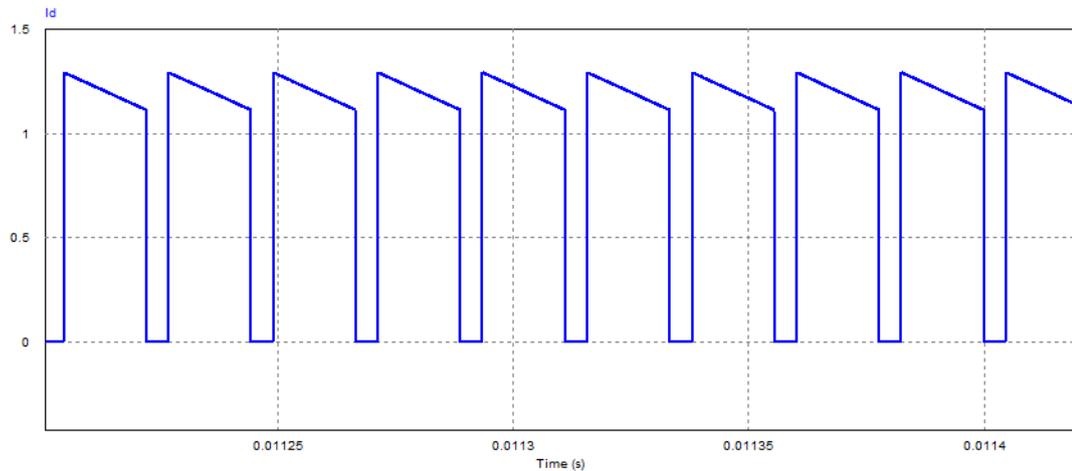
As formas de ondas apresentada nas Figura 26 e Figura 27, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada no diodo e a Tabela 16 e Tabela 17 seus respectivos valores.



**Figura 26: Conversor *buck*, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2.**  
 Fonte: Autoria própria.

**Tabela 16: Conversor *buck*, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	300V	300V

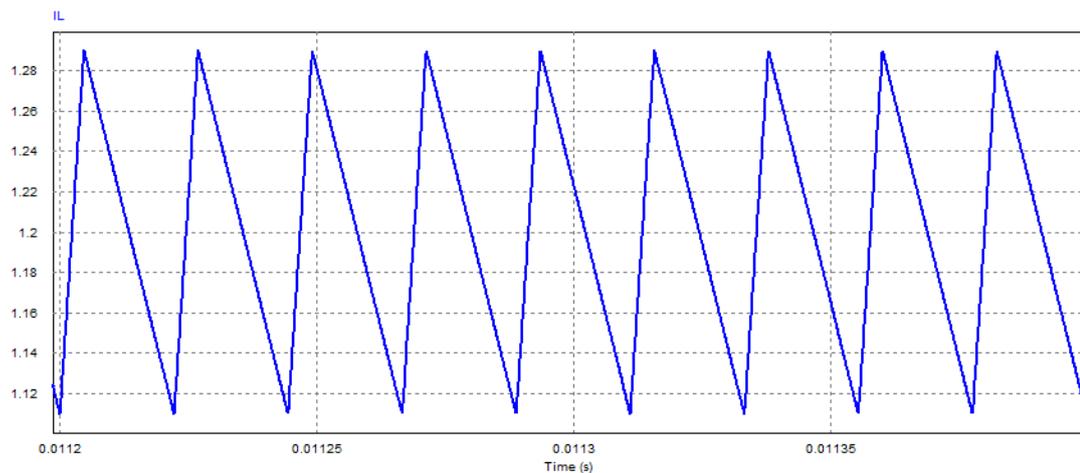


**Figura 27: Conversor *buck*, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 17: Conversor *buck*, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,947 A	0,9427 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,29 A	1,29 A

A Figura 28 representa a forma de onda da corrente no indutor, que conforme o observado nota-se, que o indutor carrega e descarrega em um período sem a existência de um tempo morto com valor nulo, o que caracteriza o modo de condução contínua.



**Figura 28: Forma de onda da corrente no indutor.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como era esperado por projeto os esforços máximos nos semicondutores são os mesmos para a chave *S* e o diodo *D*.

Os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 300V e uma corrente máxima de 1,29 A.

Dessa maneira conforme o simulado, o conversor CC-CC *buck* deve fornecer uma potência média de 75,828 W admitindo uma máxima variação potência de até 76,5 W.

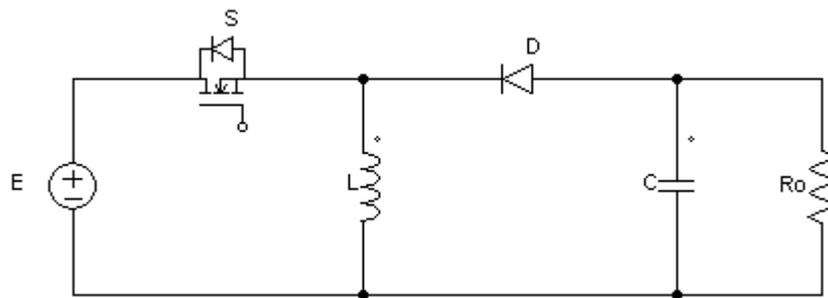
Portanto o conversor atende as de projeto que determina no máximo 1% de variação de tensão e corrente na carga.

Com a realização do projeto e a simulação do conversor CC-CC *buck* para o acionamento de dois arranjos de cargas, foi possível determinar que o conversor *buck* designa menores esforços de corrente e tensão para a primeira configuração de carga (40 LEDs em série). Deste modo conclui-se que para o quesito esforços nos semicondutores o projeto 1 torna-se mais atrativo.

## 4 CONVERSOR CC-CC *BUCK-BOOST*

O conversor CC- CC *buck-boost*, combina as características de saída dos conversores *buck* e *boost*, ou seja, a tensão de saída pode ser igual, menor, ou maior que a tensão de entrada, ocorrendo inversão de polaridade na tensão de saída (AHMED, 2000; BARBI; MARTINS, 2006).

Esse conversor é amplamente utilizado em circuitos eletrônicos que necessitam mais que um nível de tensão, sem a utilização de outra fonte de energia externa (AHMED, 2000; BARBI; MARTINS, 2006).

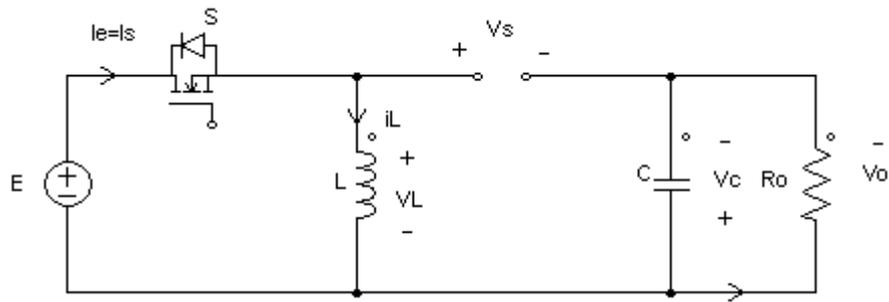


**Figura 29: Conversor *buck-boost*.**  
Fonte: Autoria própria.

O modo de funcionamento dependerá do valor atribuído a razão cíclica  $D$ , que pode variar de 0 a 1. Se  $D < 0.5$  a tensão de saída será menor que a tensão de entrada e se  $D$  assumir valores maiores que 0.5 a tensão de saída será maior que a tensão de entrada. Seu funcionamento tem por base o acumulo de energia em um indutor (BARBI; MARTINS, 2006; AHMED, 2000).

### 4.1 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR *BUCK-BOOST* COM A CHAVE $S$ FECHADA

Etapa 1: Chave  $S$  fechada, como mostra a Figura 30, o diodo  $D$  não conduz, a fonte  $E$  fornece energia exclusivamente para o indutor  $L$ , então a tensão no indutor torna-se a mesma da fonte  $E$  e a corrente no indutor aumenta linearmente com o tempo (BARBI; MARTINS, 2006; AHMED, 2000).



**Figura 30: Funcionamento do conversor *buck-boost* quando a chave *S* está fechada.**  
**Fonte: Fonte autoria própria.**

A análise e as deduções matemáticas descritas a seguir, são baseadas nas deduções do autor Hart (2001, p.217).

A tensão no indutor nessa etapa é definida em (4.1).

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.1)$$

A taxa de variação de corrente no indutor é descrito em (4.2)

$$\Delta i_L = \frac{EDT}{L} \quad (4.2)$$

A tensão no diodo é calculada através de (4.3)

$$V_D = E + V_o \quad (4.3)$$

Já a corrente máxima na chave *S* é dada em (4.4).

$$i_{SWmáx} = i_{Lmáx} \quad (4.4)$$

## 4.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR BUCK-BOOST COM A CHAVE S ABERTA

Etapa 2: Chave  $S$  aberta, representada pela Figura 31, a fonte  $E$  fica desconectada do circuito, O indutor  $L$  é responsável por fornecer energia para a carga e polarizar diretamente o diodo  $D$ . Dessa maneira, a energia que estava acumulada no indutor  $L$  é transferida para a carga e assim o processo se repete (BARBI; MARTINS, 2006; AHMED, 2000).

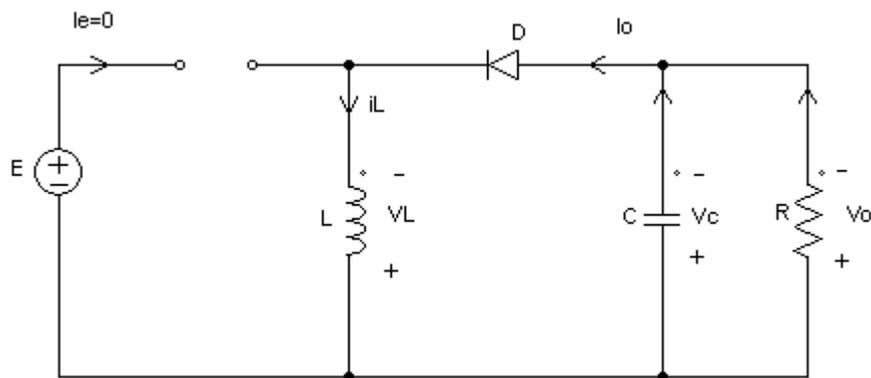


Figura 31: Funcionamento do conversor *buck-boost* quando a chave  $S$  está aberta. Fonte: Autoria própria.

A tensão no indutor nessa etapa é definida em (4.5)

$$V_L = V_o \quad (4.5)$$

A taxa de variação de corrente nessa etapa é definida em (4.6).

$$\Delta i_L = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (4.6)$$

Tensão máxima que a chave  $S$  está exposta nesse período é determinada através de (4.7).

$$V_{SW} = V_o + E \quad (4.7)$$

Sendo que a corrente máxima no diodo é descrita em (4.8).

$$i_{Swm\acute{a}x} = i_{Lm\acute{a}x} \quad (4.8)$$

#### 4.4 PROJETO DO CONVERSOR *BUCK-BOOST* UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE

Essa seção apresenta o projeto e simulação do conversor *buck-boost*, acionando a carga descrita no projeto 1 apresentado no capítulo 2, que conforme o modelo elétrico do LED, resume-se na carga demonstrada na Figura 32.

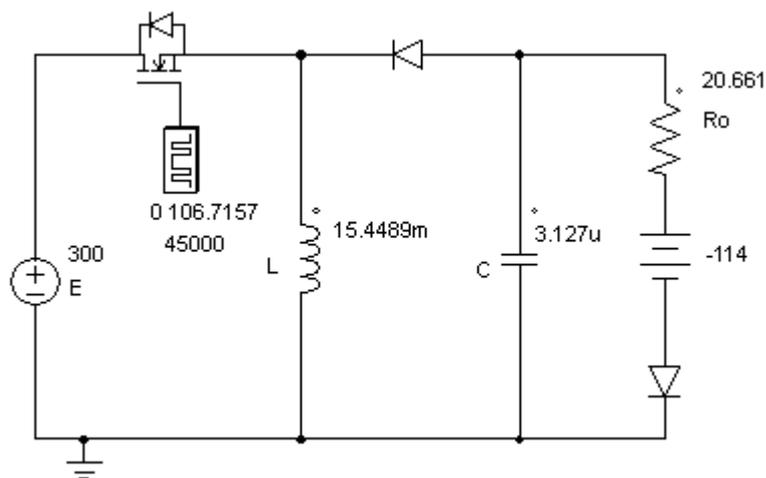


Figura 32: Conversor *buck-boost* acionando uma matriz de 40 LEDs de potência.  
Fonte: Autoria própria.

##### 4.4.1 Cálculo do ganho estático.

O ganho estático é calculado analisando a carga e descarga do indutor, que para poder operar em MCC a variação da corrente tem que ser nula em um período, conforme (4.17).

$$D = \frac{V_o}{E + V_o} = 0,2964 \quad (4.17)$$

#### 4.4.2 Dimensionamento do indutor

A corrente média no indutor é definida através de (4.18)

$$I_{Lméd} = \frac{V_o^2}{R \cdot V_E \cdot D} = 0,8528 \text{ A} \quad (4.18)$$

As correntes, máxima e mínima descritas em (4.19) e (4.20) são calculadas a partir da variação da corrente no indutor, que nesse estudo foi admitindo um valor de 15% da corrente média no indutor:

$$I_{Lmáx} = I_{Lméd} + \frac{\Delta i_L}{2} = 0,9167 \text{ A} \quad (4.19)$$

$$I_{Lmín} = I_{Lméd} - \frac{\Delta i_L}{2} = 0,7888 \text{ A} \quad (4.20)$$

Já o indutor é definido através de (4.21)

$$L = \frac{DE}{f \Delta i_L} = 15,4489 \text{ mH} \quad (4.21)$$

#### 4.4.3 Dimensionamento do capacitor.

O capacitor é responsável por fornecer energia para a carga durante o tempo de condução ( $t_c$ ), da chave S, portanto o capacitor é definido em (4.22)

$$C = \frac{DI_o}{f \Delta V_C} = \frac{DV_o}{f R_o \Delta V_C} = 3,127 \text{ } \mu\text{F} \quad (4.22)$$

As tensões são calculadas em (4.23) e (4.24) considerando uma variação de tensão de 1% na carga.

$$V_{Cméd} = V_o = 126,3984 \text{ V} \quad (4.23)$$

$$V_{Cm\acute{a}x} = V_C + \frac{\Delta V_C}{2} = 127,03 \text{ V} \quad (4.24)$$

#### 4.4.4 Dimensionamento do diodo

A corrente de pico ou máxima que passa pelo diodo, é a mesma no indutor  $L$  descrito em (4.25).

$$I_{Dm\acute{a}x} = I_{Lm\acute{a}x} = I_{Lm\acute{e}d} + \frac{\Delta i_L}{2} = 0,9167 \text{ A} \quad (4.25)$$

Já a corrente média no diodo é descrita em (4.26).

$$I_{Dm\acute{e}d} = I_{Lm\acute{e}d}(1 - D) = 0,6 \text{ A} \quad (4.26)$$

A tensão máxima no diodo é descrita em (4.27)

$$V_{Dm\acute{a}x} = E + V_o = 426,3984 \text{ V} \quad (4.27)$$

#### 4.4.5 Dimensionamento da chave S

A determinação das correntes no circuito é fundamental para o correto dimensionamento dos componentes, pois são essas correntes que circulam através semicondutores (BARBI; MARTINS, 2006).

A corrente média na chave S é calculada através de (4.28).

$$I_{Sm\acute{e}d} = I_{Lm\acute{e}d}D = 0,2528 \text{ A} \quad (4.28)$$

E a corrente máxima no dispositivo é calculada por (4.4.29).

$$I_{Sm\acute{a}x} = I_{Lm\acute{a}x} = I_{Lm\acute{e}d} + \frac{\Delta i_L}{2} = 0,9167 \text{ A} \quad (4.29)$$

A tensão máxima que a chave S deve suportar é calculada através de (4.30).

$$V_{Smáx} = E + V_o = 426,3984 \text{ V} \quad (4.30)$$

A

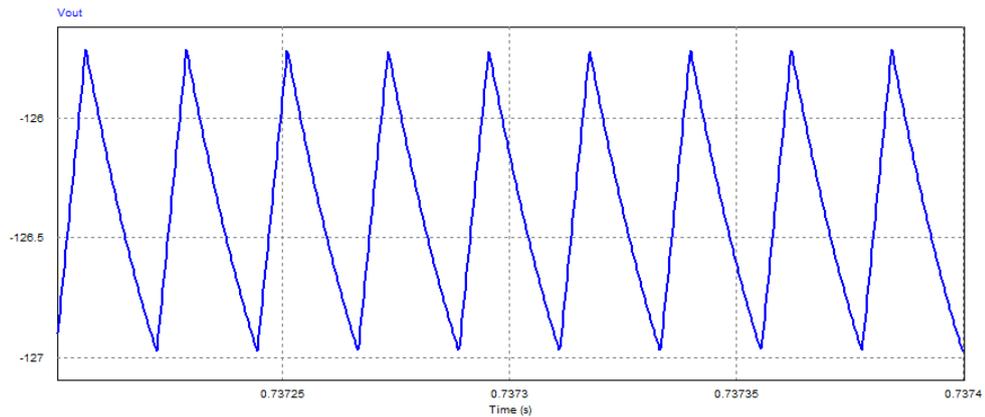
Tabela 18, descreve os valores projetados dos componentes do conversor *buck-boost*, para o acionamento de uma matriz de 40 LEDs ligados em série.

**Tabela 18: Parâmetros do conversor *buck-boost*, para o projeto 1.**

D	0,2964
$I_{Lméd}$	0,8528 A
$I_{Lpk}$	0,9167 A
$I_{Lmín}$	0,7888 A
L	15,4489 mH
$V_{Cméd}$	126,3984 V
$V_{Cmín}$	125,7664 V
$V_{Cmáx}$	127,03 V
C	3,127 $\mu$ F
$I_{Dméd}$	0,6 A
$I_{Dmáx}$	0,9167 A
$I_{Sméd}$	0,2528 A
$I_{Smáx}$	0,9167 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	426,3984 V

#### 4.4.6 Resultados de simulação

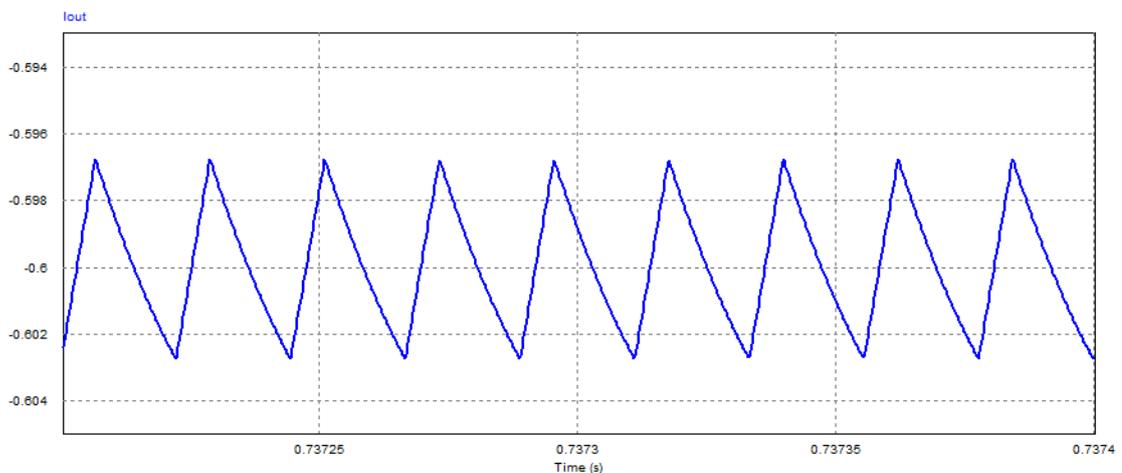
As formas de onda das Figura 33 e Figura 34 representam as formas de onda da tensão e da corrente na carga e a Tabela 19 e Tabela 20, seus respectivos valores, nesse caso foi considerado uma matriz de 40 LEDs de potência ligados em série.



**Figura 33: Conversor *buck-boost*, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 19: Conversor *buck-boost*, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	-126,398V	-126,390V
Tensão máxima	-125,766V	-125,760V
Tensão mínima	-127,030V	-126,998V



**Figura 34: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

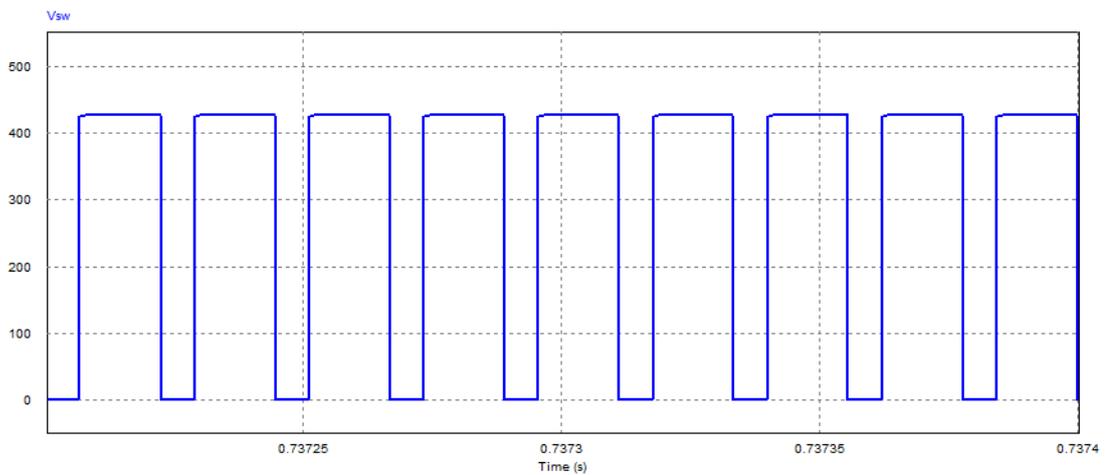
**Tabela 20: Conversor *buck-boost*, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-0,6A	-0,6A
Corrente mínima	-0,594	-0,597A
Corrente máxima	-0,606A	-0,6025A

Como se pode observar nas simulações o conversor *buck-boost* fornece um valor de tensão negativo para a carga, tendo que tomar medidas alternativas para alimentar a carga proposta. Porém pela análise do projeto e simulação denota-

se que seu funcionamento foi satisfatório devido o conversor ter atendido os limites de variações de tensão e corrente na carga, impostos como premissas de projeto.

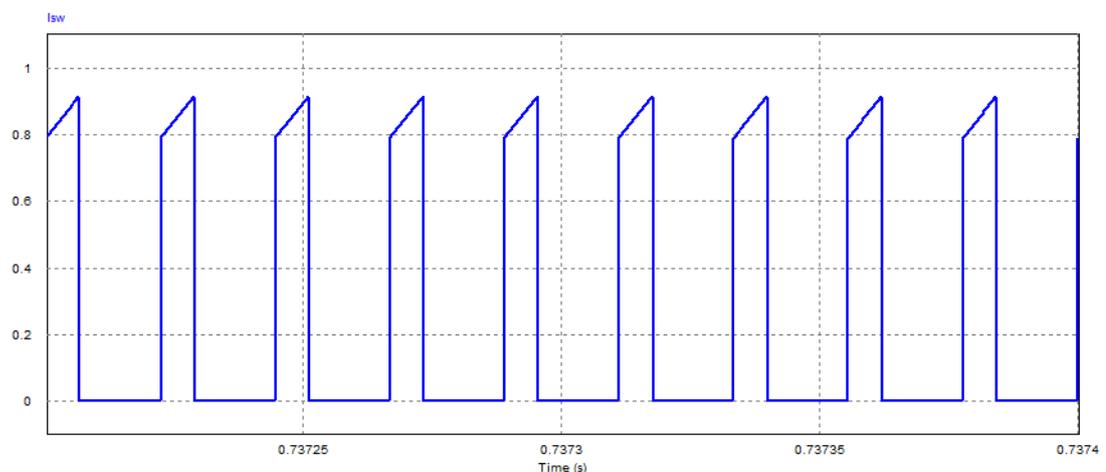
As formas de ondas apresentadas nas Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 representam a formas de ondas simuladas da tensão e da corrente, respectivamente, nos semicondutores do circuito e as Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 apresentam os valores projetados e os simulados.



**Figura 35: Conversor *buck-boost*, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 21: Conversor *buck-boost*, valores de tensão aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	426,3984 V	426,92 V



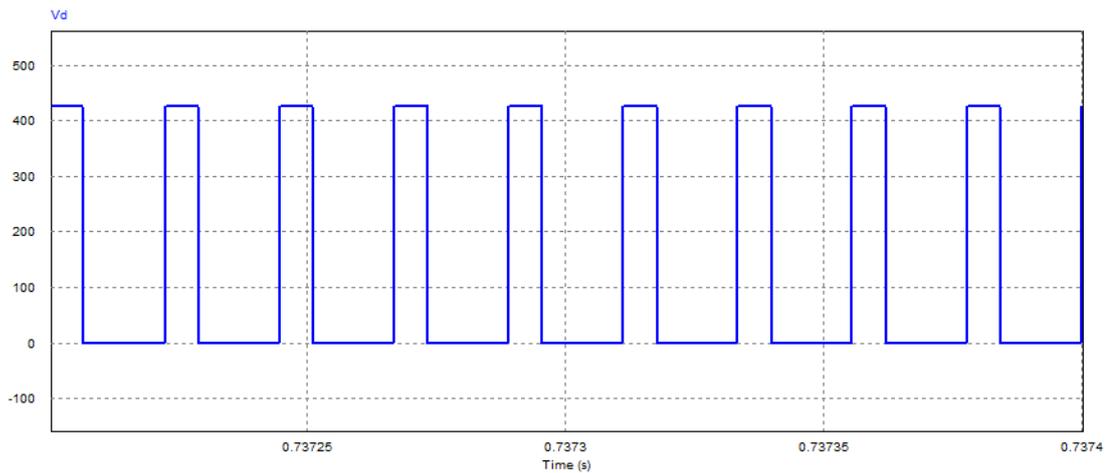
**Figura 36: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 22: Conversor *buck-boost*, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
--	-----------	----------

Corrente média	0,2528 A	0,2496 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	0,9167 A	0,9164 A

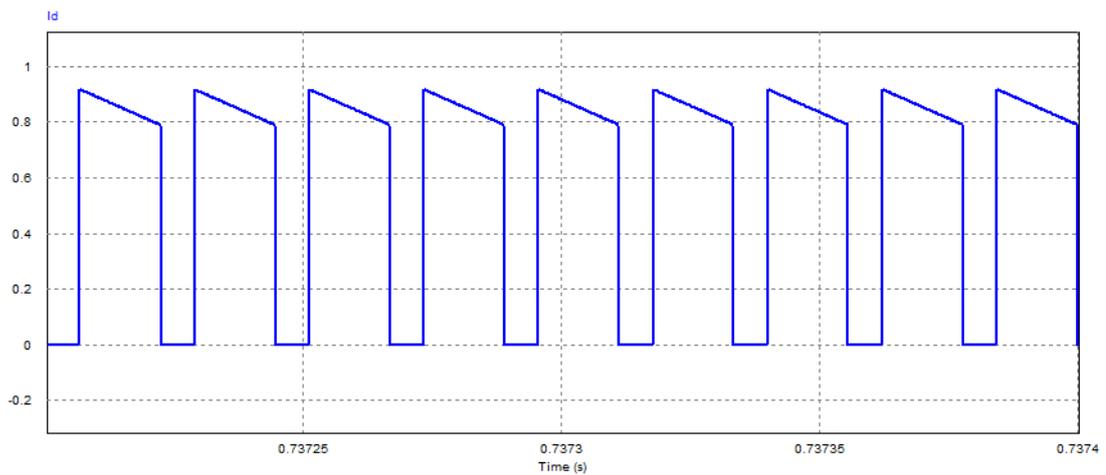
As formas de ondas apresentadas nas Figura 37 e Figura 38, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada no diodo.



**Figura 37: Conversor buck-boost, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1.**  
Fonte: autoria própria.

**Tabela 23: Conversor buck-boost, valores de tensão aplicados no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	426,3984 V	426,8526 V



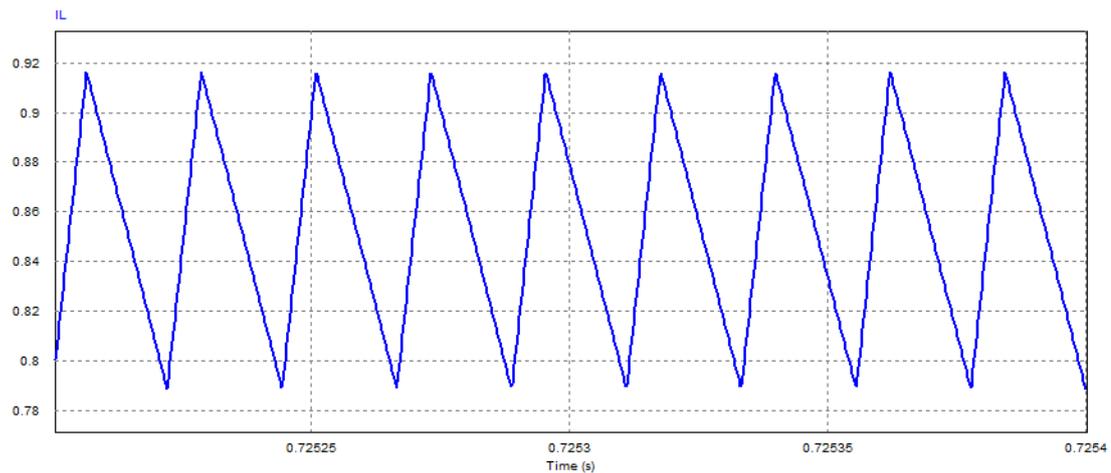
**Figura 38: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 24: Conversor *buck-boost*, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,6 A	0,599 A
Corrente mínima	0	0

Corrente máxima	0,916 A	0,916 A
-----------------	---------	---------

A Figura 39 comprova que o conversor está operando em modo de condução contínua, devido a forma de onda da corrente no indutor não apresentar um tempo morto em um período de carga e descarga do indutor.



**Figura 39: Conversor buck-boost, forma de onda da corrente no indutor, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

As Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 com suas respectivas tabelas de valores projetados e simulados, representam os esforços máximos nos semicondutores, que são os mesmos para a chave *S* e o diodo *D*.

Através do projeto e simulação pode-se afirmar que os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 426,3984 V e uma corrente máxima de 0,9167 A.

Portanto, conforme o simulado, a topologia *buck-boost* deve fornecer uma potência média de 75,834 W e uma variação máxima de potência de 76,5 W, o que fica especificado dentro das condições de projeto que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga.

#### 4.5 PROJETO DO CONVERSOR *BUCK-BOOST* UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS EM SÉRIE

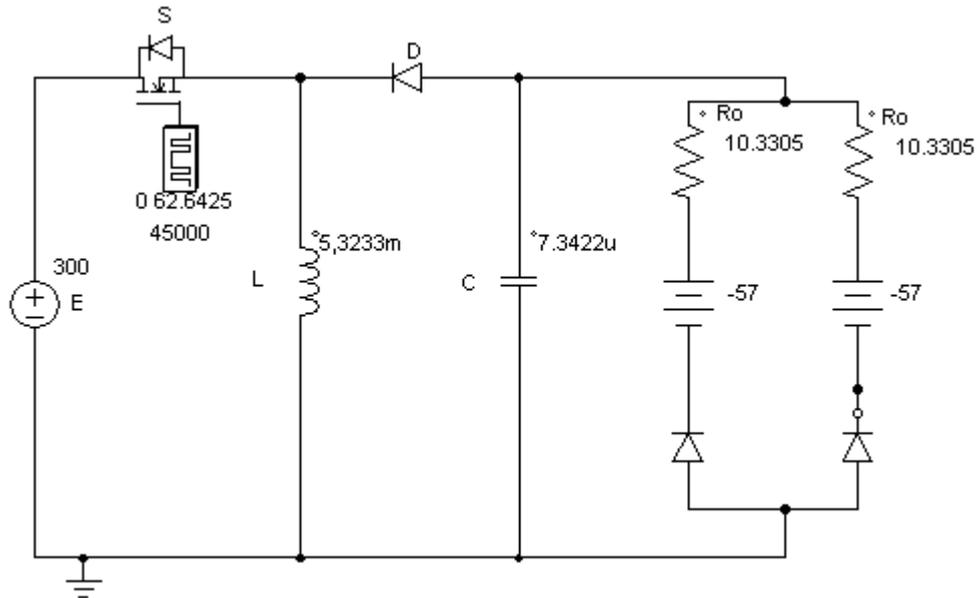


Figura 12: Conversor *buck-boost* acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada.  
Fonte: Autoria própria.

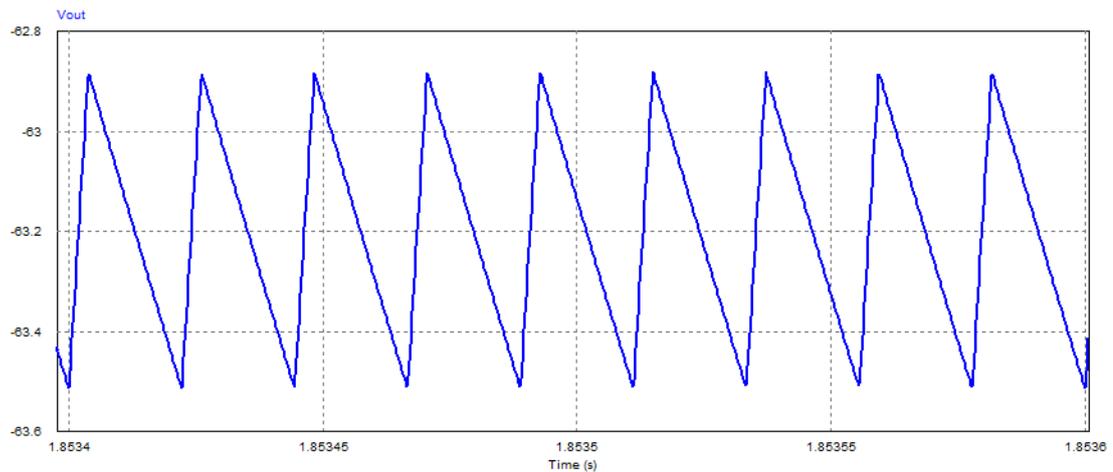
Realizando o projeto do conversor *buck-boost*, conforme a seção anterior, porém para a carga da Tabela 2 do Capítulo 2, obtêm-se os parâmetros descritos na Tabela 25.

Tabela 25: Parâmetros do conversor *buck-boost* aplicado a uma matriz com 2 vetores de 20 LEDs cada.

D	0,1740
$I_{Lméd}$	1,4528 A
$I_{Lmáx}$	1,5618 A
$I_{Lmín}$	1,3438 A
L	5,3233 mH
$V_{Cméd}$	63,1992 V
$V_{Cmín}$	62,8832 V
$V_{Cmáx}$	63,5152 V
C	7,3422 $\mu$ F
$I_{Dméd}$	1,2 A
$I_{Dmáx}$	1,5618 A
$I_{Sméd}$	0,2528 A
$I_{Smáx}$	1,5618 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	363,1992V

#### 4.5.1 Resultados de simulação

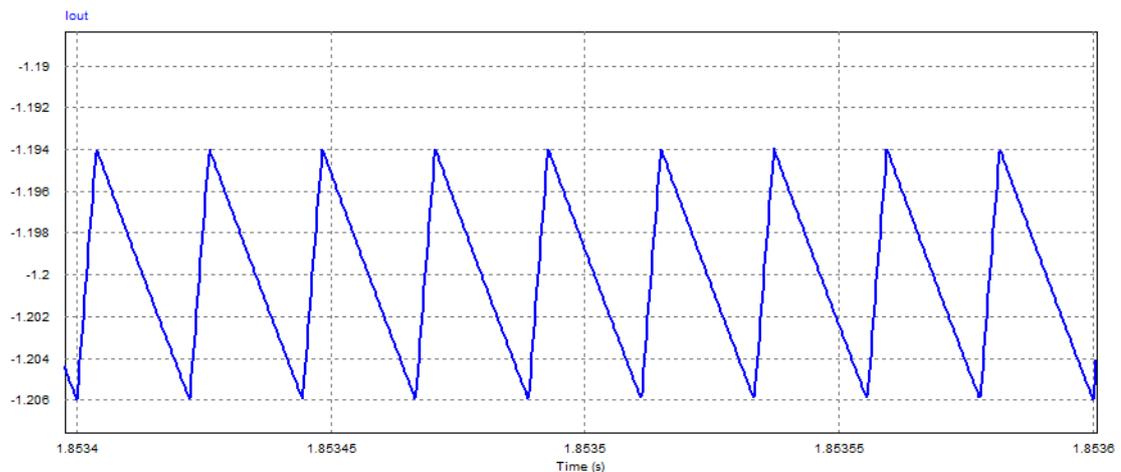
As formas de onda da tensão e da corrente aplicadas na carga estão representadas na Figura 40 e Figura 41 com suas respectivas Tabelas, nesse caso os resultados obtidos são específicos para o segundo projeto, descrito no Capítulo 2.



**Figura 40: Conversor buck-boost, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 26: Conversor buck-boost, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	-63,1992V	-63,1946V
Tensão mínima	-62,8832V	-62,8848V
Tensão máxima	-63,5152V	-63,4976V



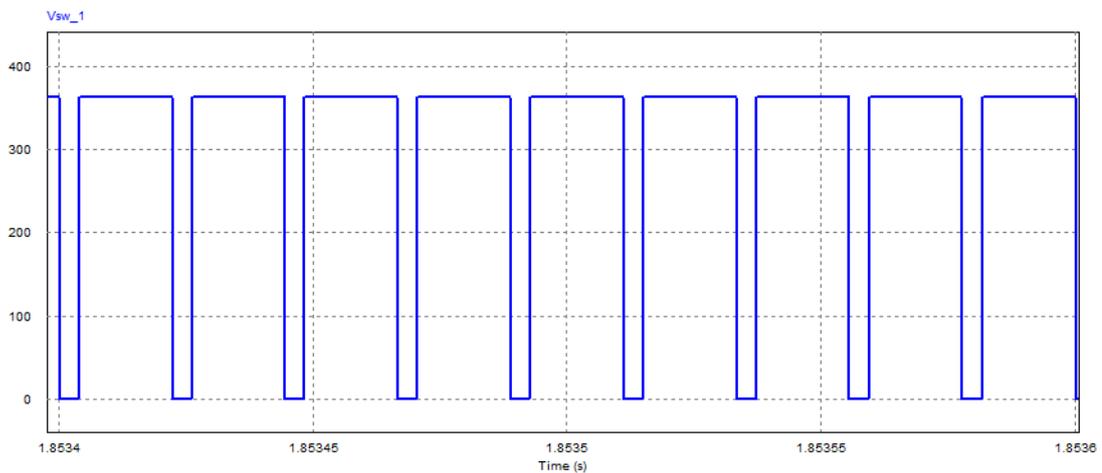
**Figura 41: Conversor buck-boost, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 27: Conversor buck-boost, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-1,2A	-1,2 A
Corrente mínima	-1,194A	-1,1940 A
Corrente máxima	-1,206A	-1,205 A

Como se pode observar nas Figura 40 e Figura 41 o conversor *buck-boost* manteve os níveis de variação de tensão e corrente conforme o projetado, portanto esse conversor também atendeu os requisitos de projeto para a segunda configuração de carga, tornando-o um possível candidato para assumir o estágio PC.

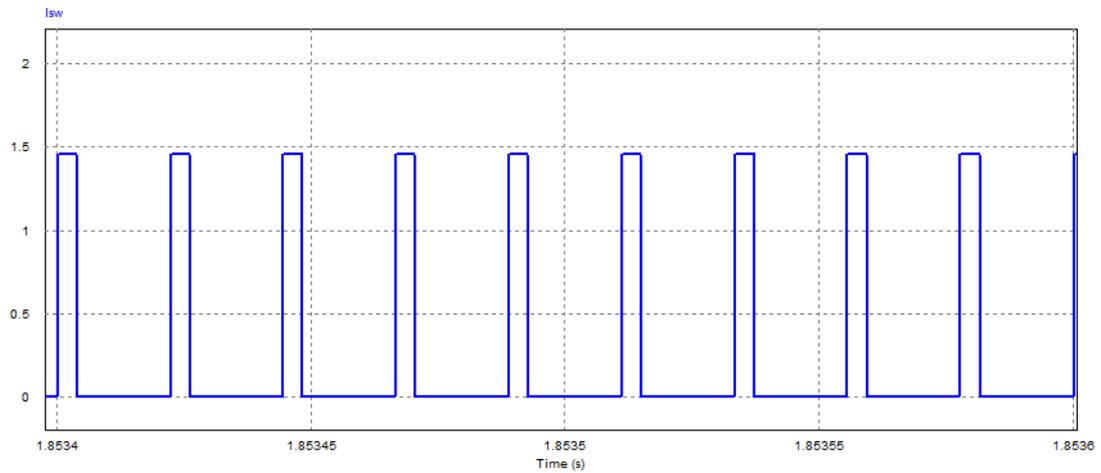
As formas de ondas apresentada na Figura 42 e Figura 43, representam as formas de ondas simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada na chave S.



**Figura 42: Conversor buck-boost, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 28: Conversor *buck-boost*, valor de tensão aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	363,1992V	363,4 V

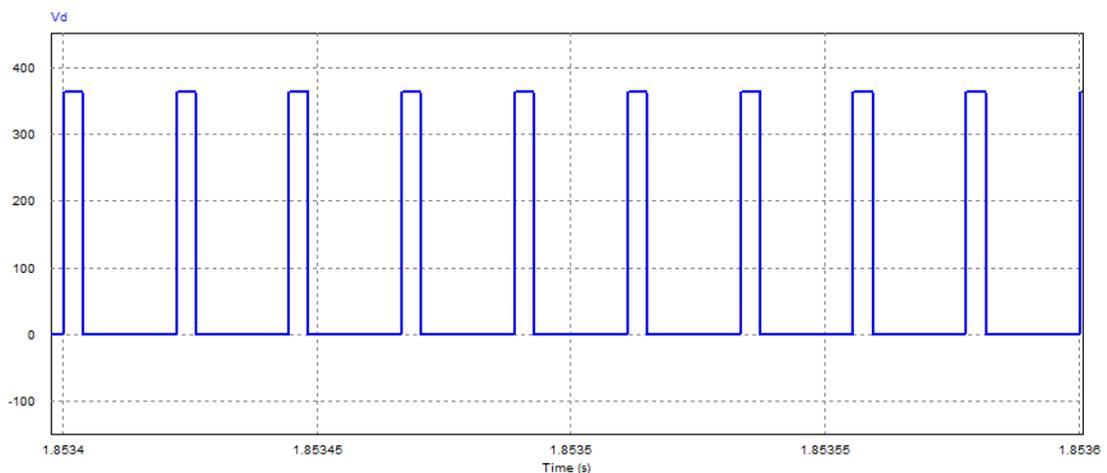


**Figura 43: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2.**  
 Fonte: Autoria própria.

**Tabela 29: Conversor *buck-boost*, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,2528 A	0,2603 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,5618 A	1,45 A

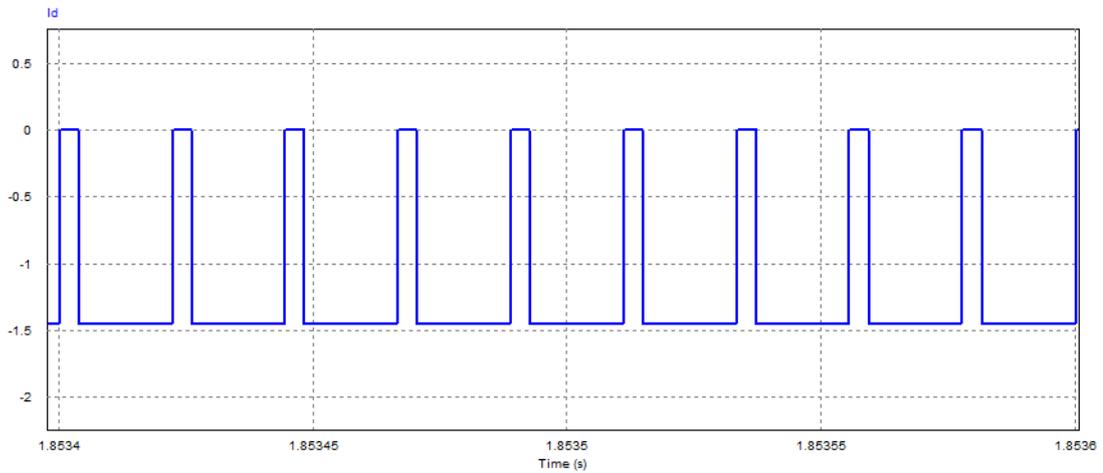
As formas de ondas apresentadas nas Figura 44 e Figura 45, representam as formas de ondas simulada da tensão e da corrente respectivamente, aplicado no diodo.



**Figura 44: Conversor *buck-boost*, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2.**  
 Fonte: autoria própria.

**Tabela 30: Conversor *buck-boost*, valore de tensão aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	363,1992V	363,4 V

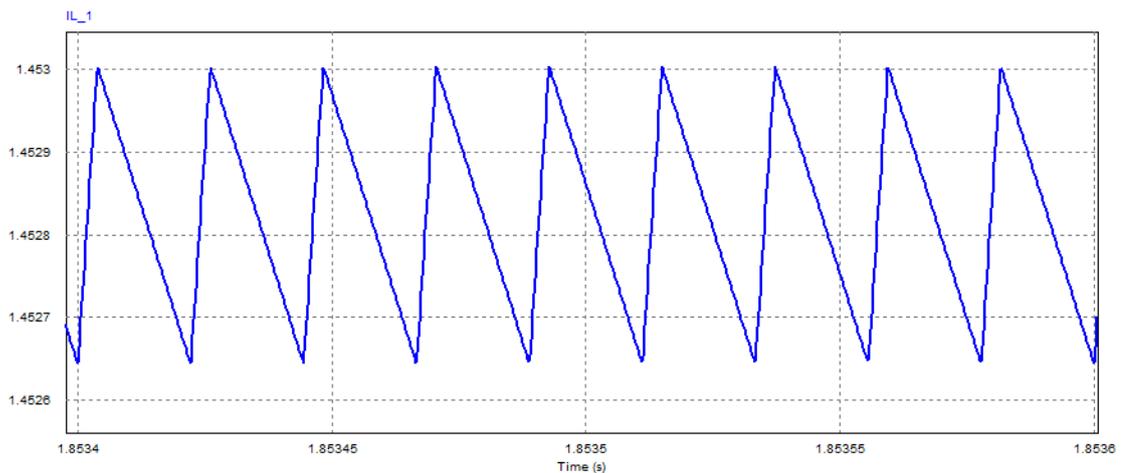


**Figura 45: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 31: Conversor *buck-boost*, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	1,2 A	1,1953 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,5618 A	1,4527 A

Na Figura 46, é representado a forma de onda da corrente no indutor, necessária para provar que o conversor está operando em modo de condução contínua, fato esse comprovado devido o indutor carregar e descarregar em um período sem a existência de um tempo morto com valor nulo.



**Figura 46: Conversor *buck-boost*, forma de onda da corrente no indutor, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os esforços máximos de tensão e corrente nos semicondutores são os mesmos para a chave *S* e o diodo *D*, como pode ser avaliado nas Figura 42, Figura

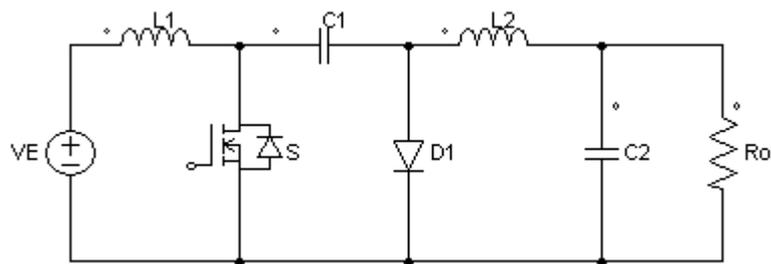
43, Figura 44 e Figura 45 com suas respectivas tabelas de valores projetados e simulados. Todavia os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 363,4 V e uma corrente máxima de 1,45 A.

Considerando os valores médios e máximos de tensão e corrente aplicados na carga, conclui-se que o conversor CC-CC *buck-boost* deve fornecer uma potência média de 75,83 W admitindo uma máxima variação potência de 76,5 W, o que fica especificado das premissas de projeto.

Na realização do projeto e a simulação do conversor CC-CC *buck-boost* para o acionamento dos dois arranjos de cargas, determina-se que a topologia requer menos esforços de corrente e tensão para a primeira configuração de carga (40 LEDs em série). Portanto para o quesito esforços nos semicondutores o projeto 1 torna-se mais viável. Porém analisando o valor da indutância, o projeto 2, torna-se mais atrativo devido o valor do indutor ser menor.

## 5 CONVERSOR CUK

O conversor CC-CC Cuk pode operar com um valor de tensão na saída maior ou menor que a tensão de entrada, ocasionando uma inversão de polaridade na saída. Possui a entrada e a saída com característica em fonte de corrente. Outra característica desse conversor é a maneira como a energia é transferida, a transferência de energia não está associada ao indutor e sim ao capacitor  $C_1$ , a topologia é apresentada na Figura 1 (HART, 2001).



**Figura 47: Circuito elétrico do conversor CuK.**

**Fonte: Autoria própria.**

A análise do conversor Cuk é feita do mesmo modo que os outros conversores estudados, ou seja, dividindo em duas etapas de operação, etapa 1, quando a chave  $S$  encontra-se fecha e a etapa 2 quando a chave  $S$  está aberta.

Equacionando o circuito da Figura 47 conforme as leis de Kirchhoff obtém-se (5.1)

$$-V_E + V_{L1} + V_{C1} - V_o + V_{L2} = 0 \quad (5.1)$$

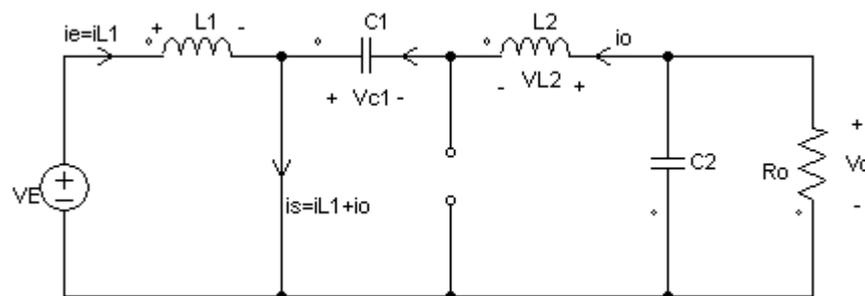
Admitindo-se que a tensão média nos indutores é nula em regime permanente obtém-se (5.2).

$$V_{C1} = V_E + V_o \quad (5.2)$$

## 5.1 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR CUK COM A CHAVE S FECHADA

Etapa 1: Chave  $S$  fechada, pela análise do circuito da Figura 48, o diodo  $D$  fica polarizado inversamente, comportando-se como circuito aberto. As correntes ( $i_{L1}$  e  $i_{L2}$ ) circulam pela chave  $S$ . O capacitor  $C_1$  se descarrega enquanto  $L_1$  é carregado com a energia da fonte,  $C_2$  se descarrega transferindo energia para  $L_2$  e para a carga (BRITTO, 2009).

A representação do circuito elétrico do conversor Cuk operando na primeira etapa de operação é descrita na Figura 48, sendo que análise e as deduções matemáticas descritas a seguir, são baseadas nas deduções do autor Britto (2009, p. 100) e Hart (2001, p.223).



**Figura 48: Conversor Cuk representando a etapa de operação 1, quando a chave  $S$  está conduzindo.**

Fonte: Autoria própria.

As deduções e análises matemáticas são baseadas nos autores (AHMED, 2000; BARBI; MARTINS, 2006; HART, 2001)

Tensão no indutor  $L_1$  descrita em (5.3)

$$V_{L1} = V_E \quad (5.3)$$

A variação de carga no indutor 1 é descrito em (5.4).

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_E}{L_1} DT \quad (5.4)$$

Já a tensão no indutor 2 é descrita e (5.5)

$$V_{L2} = V_E \quad (5.5)$$

A taxa de variação de carga no indutor 2 é calculada em (5.6).

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_E}{L_2} DT \quad (5.6)$$

A corrente que circula através da chave S é representada em (5.7).

$$i_{Sw} = i_{L1} + i_{L2} \quad (5.7)$$

A corrente no capacitor 1 é a mesma que circula no indutor 2 porém com sentido contrario, como pode ser observado na Figura 48 e na Equação (5.8).

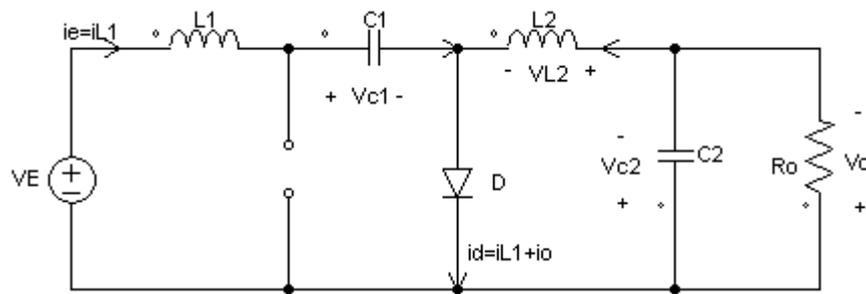
$$i_{C1} = -i_{L2} \quad (5.8)$$

A tensão no diodo é descrita em (5.9)

$$V_D = V_E + V_o \quad (5.9)$$

## 5.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR CUK COM A CHAVE S ABERTA

Etapa 2: Chave S aberta, o diodo D fica polarizado diretamente e entra em condução, as correntes oriundas de  $L_1$  e  $L_2$  circulam através do diodo, o capacitor  $C_1$  é carregado pela energia do indutor  $L_1$  que é a mesma da fonte, a energia em  $L_2$  é transferida para o capacitor  $C_2$  e para a carga, como ilustra a Figura 49 (BARBI; MARTINS, 2006; HART, 2001).



**Figura 49: Conversor Cuk quando a chave S está aberta.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nessa etapa a tensão no indutor 1 é definida por (5.10)

$$V_{L1} = -V_o \quad (5.10)$$

A taxa de variação de corrente no indutor 1 é definida através de (5.11)

$$\Delta i_{L1} = \frac{-V_o}{L_1} (1 - D)T \quad (5.11)$$

Já a tensão no indutor 2 é definida através de (5.12)

$$V_{L2} = -V_o \quad (5.12)$$

E a taxa de variação da corrente no indutor 2 é definida em (5.13)

$$\Delta i_{L2} = -\frac{V_o}{L_2} (1 - D)T \quad (5.13)$$

A corrente que circula através do diodo é calculada em (5.14).

$$i_D = i_{L1} + i_{L2} \quad (5.14)$$

A tensão que a chave S deve suportar nessa etapa é definida em (5.15)

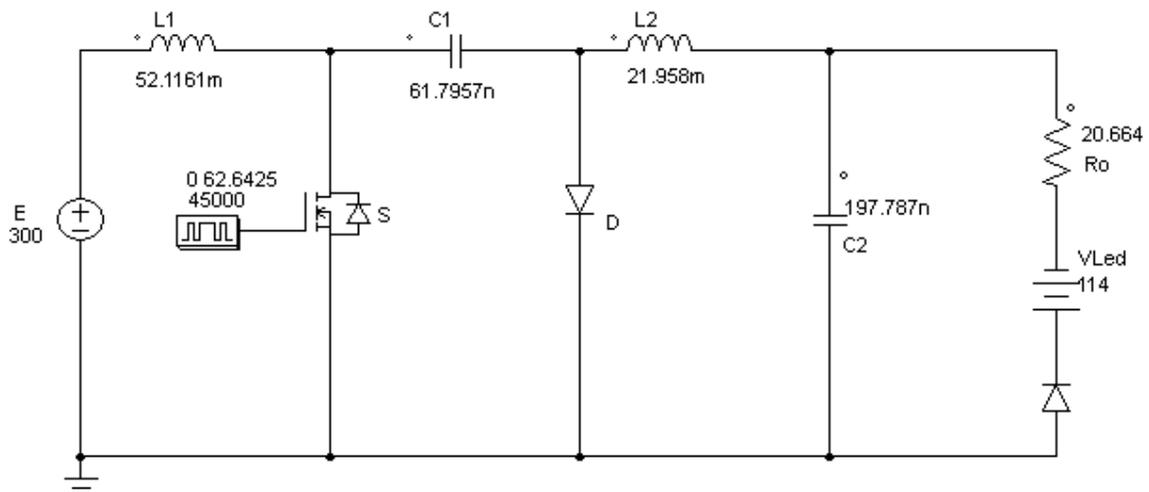
$$V_{sw} = V_E + V_o \quad (5.15)$$

A corrente no capacitor 1 é a mesma que circula no indutor 1, como pode ser observado na Figura 49 e na Equação (5.16).

$$i_{C1} = i_{L1} \quad (5.16)$$

#### 5.4 PROJETO DO CONVERSOR CUK UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE

Essa seção trata-se do projeto e simulação do primeiro arranjo de carga descrito na Tabela 1 do Capítulo 2, que resulta no modelo de carga apresentado na Figura 5, para realização do projeto é necessário levar em consideração todas as premissas de projeto descritas na Tabela 3 do Capítulo 2.



**Figura 50: Conversor Cuk acionando uma matriz de 40 LEDs de potência.**  
Fonte: Autoria própria.

##### 5.4.1 Cálculo do ganho estático

O ganho estático do conversor é definido através de (5.17).

$$D = \frac{V_o}{V_o + E} = 0,2964 \quad (5.17)$$

#### 5.4.2 Dimensionamento do indutor $L_1$

O indutor  $L_1$  é calculado através de (5.18), considerando a variação de corrente  $\Delta I_{L1}$  como 15 %.

$$L_1 = \frac{V_E D}{f \Delta I_{L1}} = 52,116 \text{ mH} \quad (5.18)$$

A corrente média que passa pelo indutor 1 é a mesma da entrada do conversor, conforme indica (5.19)

$$I_{L1(méd)} = \frac{P_E}{V_E} = \frac{I_o D}{1 - D} = 0,2528 \text{ A} \quad (5.19)$$

A corrente máxima no indutor é definida em (5.20).

$$I_{L1(máx)} = I_{L1(méd)} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} = 0,2717 \text{ A} \quad (5.20)$$

#### 5.4.3 Dimensionamento do indutor $L_2$

O indutor 2 é calculado através de (5.21).

$$L_2 = \frac{-V_o \cdot (1 - D)}{f \cdot \Delta I_{L2}} = 21,958 \text{ mH} \quad (5.21)$$

A corrente máxima no indutor 2 é descrita em 5.22

$$I_{L2máx} = I_{L2(méd)} + \frac{\Delta I_{L2}}{2} = 0,645 \text{ A} \quad (5.22)$$

#### 5.4.4 Dimensionamento do capacitor ( $C_1$ )

O capacitor ( $C_1$ ) pode ser projetado através da variação de tensão em  $C_1$ , e seu valor é descrito em (5.23).

$$C_1 = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V_{C1} \cdot f} = 61.7957 \text{ nF} \quad (5.23)$$

A tensão média no capacitor 1 é definida em (5.24)

$$V_{C1\text{méd}} = V_E + V_o = 426.3984 \text{ V} \quad (5.24)$$

E a tensão máxima é descrita em (5.25).

$$V_{C1(\text{máx})} = V_{C1\text{méd}} + \frac{\Delta V_{C2}}{2} = 458.3783 \text{ V} \quad (5.25)$$

#### 5.4.5 Dimensionamento do capacitor $C_2$

Analogamente ao capacitor  $C_1$ , é calculado o capacitor 2, descrito em (5.26).

$$C_2 = \frac{V_o(1-D)}{8 \cdot L_2 \cdot \Delta V_{C2} \cdot f^2} = 197,787 \text{ nF} \quad (5.26)$$

A tensão média e máxima no capacitor  $C_2$  é a mesma tensão média e máxima de saída, descritas em (5.27) e (5.28).

$$V_{C2} = V_o \quad (5.62)$$

$$V_{C2(\text{máx})} = V_o + \frac{\Delta V_{C2}}{2} \quad (5.63)$$

#### 5.4.6 Dimensionamento da chave S e do diodo

A corrente média que o diodo deve suportar é a soma das correntes médias dos indutores multiplicado pelo período de tempo que o diodo fica conduzindo, conforme indicado em (5.64).

$$I_{D(méd)} = (I_{L1(méd)} + I_{L2(méd)})(1 - D) = 0,6 \text{ A} \quad (5.64)$$

Analogamente a corrente média que a chave S deve suportar é a soma das correntes médias dos indutores multiplicado pelo período de tempo que a chave fica conduzindo, conforme indicado em (5.65).

$$I_{S(méd)} = (I_{L1(méd)} + I_{L2(méd)})D = 252,7968 \text{ mA} \quad (5.65)$$

Já a corrente máxima é a mesma para ambos os dispositivos, conforme indica a forma de onda da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a expressão (5.66).

$$I_{S(máx)} = I_{D(máx)} = I_{L1(máx)} + I_{L2(máx)} = 916,7566 \text{ mA} \quad (5.66)$$

A tensão máxima que a chave S e o diodo D devem suportar é descrita em (5.59).

A Tabela 32 descreve o valor dos componentes calculados na etapa anterior, levando em consideração as premissas de projeto descritas nas Tabelas 1 e 3 do Capítulo 2.

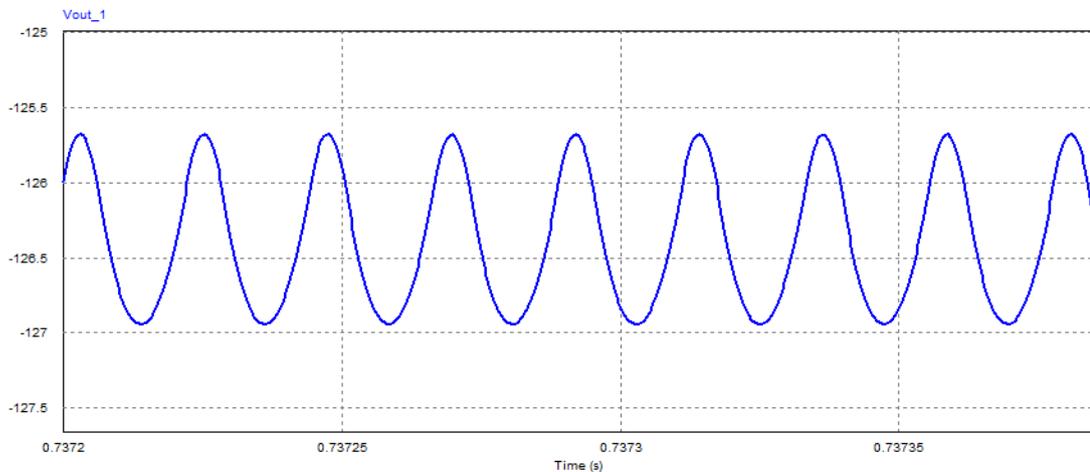
**Tabela 32: Parâmetros do conversor Cuk, para o projeto 1.**

D	0,29643
$I_{L1méd}$	252,7968 mA
$I_{L1máx}$	271,7566 mA
$I_{L1mín}$	233,837 mA
$L_1$	52,1161 mH
$I_{L2méd}$	0,6 A
$I_{L2máx}$	0,645 A
$I_{L2mín}$	0,555 A
$L_2$	21,958 mH
$V_{C1méd}$	426,3984 V

$V_{C1min}$	424,2664 V
$V_{C1máx}$	428,5304 V
$C_1$	926,935 nF
$V_{C2méd}$	126,3894 V
$V_{C2mín}$	125,7664 V
$V_{C2máx}$	127,0304 V
$C_2$	197,787 nF
$I_{Dméd}$	0,6 A
$I_{Dmáx}$	0,9167 A
$I_{Swméd}$	0,2528 A
$I_{Swmáx}$	0,9167 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	458,3783 V

#### 5.4.7 Resultados de simulação

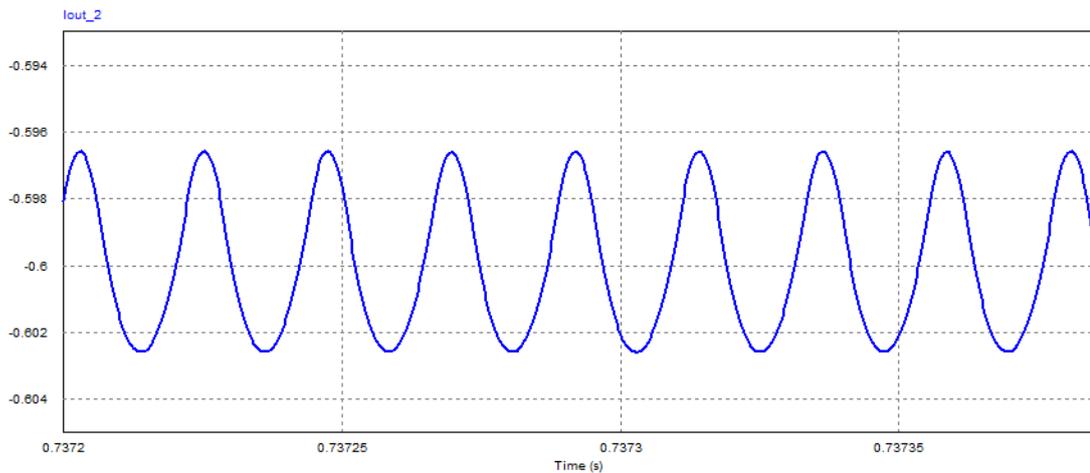
As simulações da tensão e da corrente aplicada na carga para o primeiro arranjo de carga estão descritas na Figura 51 e Figura 52 e as Tabela 33 e Tabela 34 seus respectivos valores simulados e projetados.



**Figura 51: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 33: Conversor Cuk, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	-126,398V	-126,3747 V
Tensão máxima	-125,766V	-125,7505V
Tensão mínima	-127,030V	-126,944 V



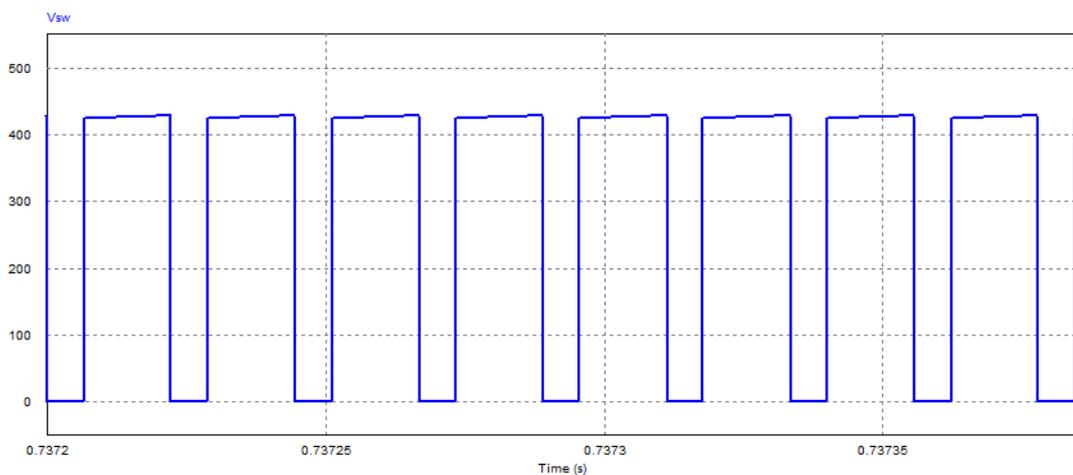
**Figura 52: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 34: Conversor Cuk, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-0,6 A	-0,5998 A
Corrente mínima	-0,597 A	-0,5965 A
Corrente máxima	-0,603 A	-0,6026 A

As Figura 51 e Figura 52 comprovam que a topologia Cuk, atendeu as premissas de acionamento da carga, mantendo a ondulação de tensão e corrente na carga dentro dos níveis desejados, conforme mostra as Tabela 33 e Tabela 34

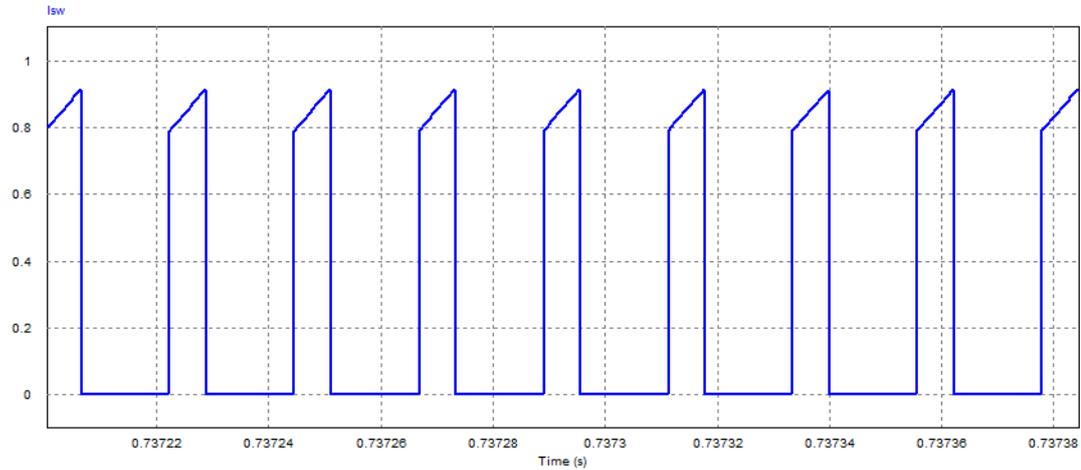
Os esforços que os semicondutores estão submetidos estão representados nas Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56, que ilustram as formas de ondas aplicadas na chave  $S$ , e no diodo  $D$ , com suas respectivas Tabelas.



**Figura 53: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

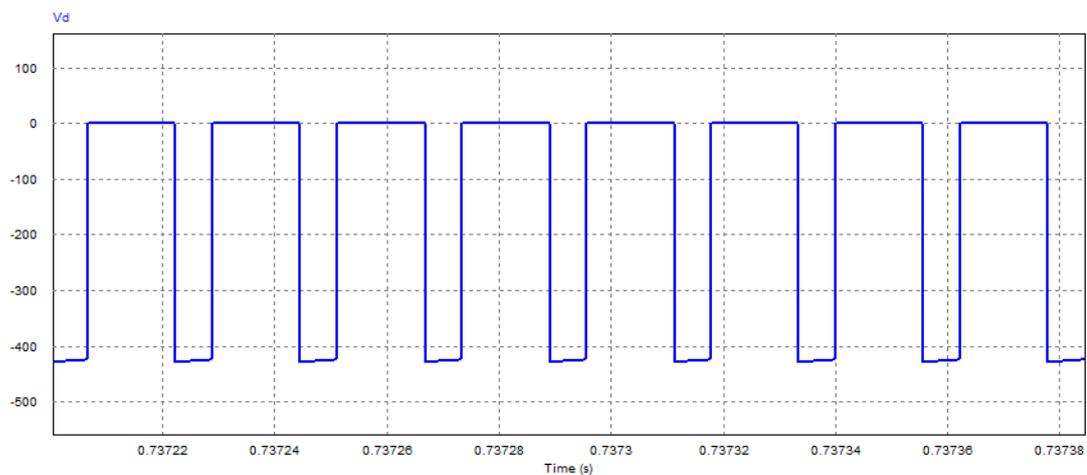
**Tabela 35: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	458,3783 V	457,6 V

**Figura 54: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.**Tabela 36: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.**

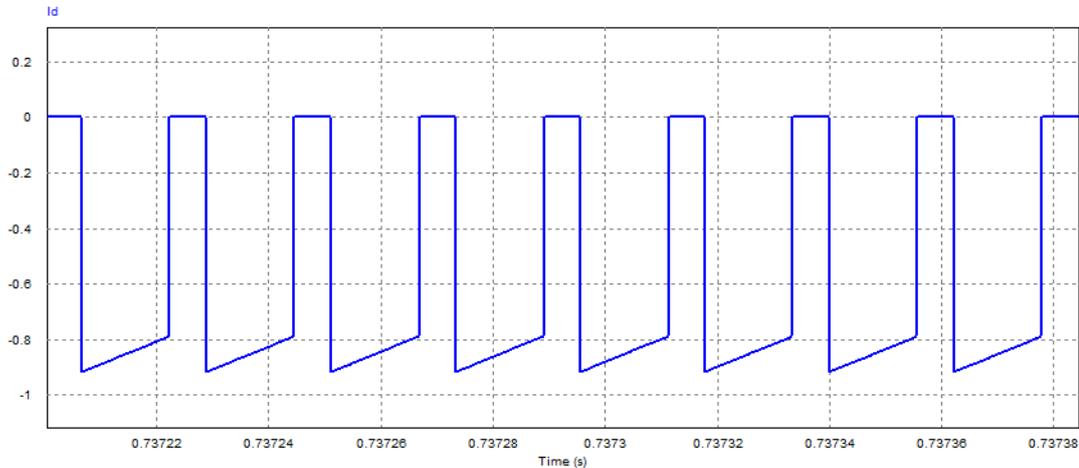
	Projetado	Simulado
Corrente média	252,8 mA	0,272 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	0,916 mA	0,9164 A

As formas de ondas apresentada na Figura 55 e Figura 56, representam as formas de ondas simulada da tensão e da corrente respectivamente, aplicada no diodo.

**Figura 55: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 37: Conversor Cuk, valor da tensão aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	458,3783 V	457,59 V

**Figura 56: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.****Tabela 38: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-0,6 A	-0,596 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	-0,9167 A	- 0,9167 A

Observando a forma de onda da corrente no diodo Figura 56, pode-se concluir que o conversor projetado está operando em modo de condução contínua, devido o diodo abrir antes que a corrente atinja um valor nulo.

Os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma corrente média no diodo de 0,596 A e 0,272 A através da chave S uma tensão máxima de 457,59 V e uma corrente máxima de 0,9167 A, conforme indica as Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56, com suas respectivas Tabelas.

Portanto a potência média que o conversor CC-CC Cuk deve fornecer é 75,83 W, com uma variação máxima de 76,6 W, o que fica especificado dentro das condições de projeto que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga.

## 5.5 PROJETO DO CONVERSOR CUK UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS

O projeto 2, consiste no acionamento da segunda configuração de carga da luminária, ou seja o conversor Cuk acionando uma matriz de dois vetores de 20

LEDs ligados em série, que conforme o modelo elétrico do LED apresentado no Capítulo 2, resume-se na carga demonstrada na Figura 57.

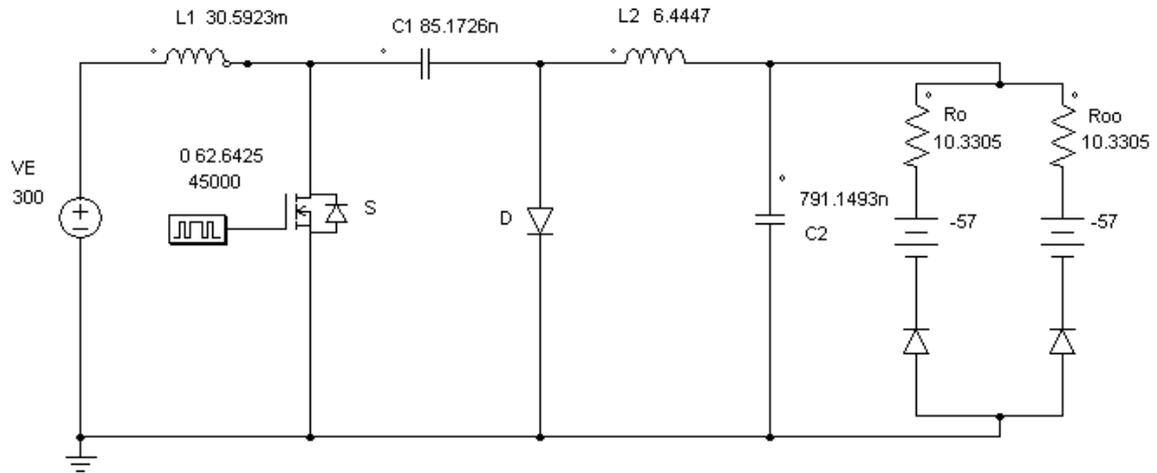


Figura 57: Conversor Cuk acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada.  
Fonte: Autoria própria.

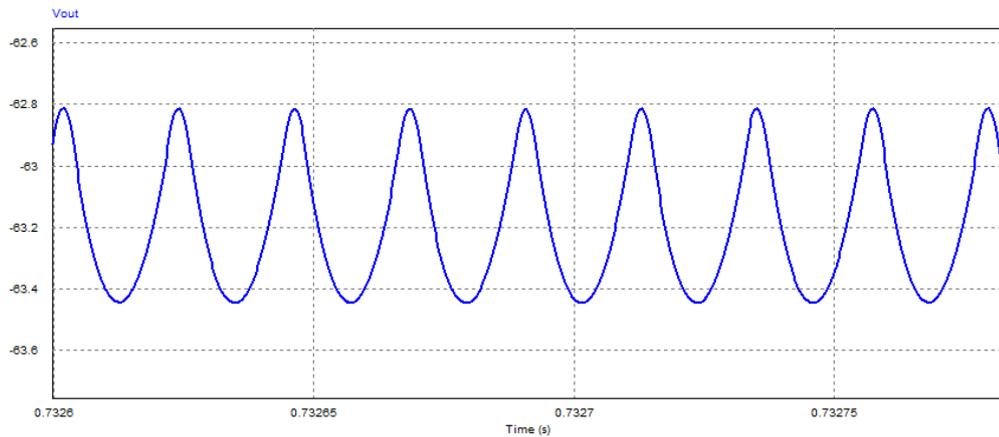
Realizando o projeto do conversor Cuk conforme a seção anterior, porém para a carga da Tabela 2 do Capítulo 2, resulta nos valores obtidos na Tabela 39.

Tabela 39: Parâmetros do conversor Cuk aplicado a uma matriz com 2 vetores de LED.

D	0,174
$I_{L1méd}$	0,2528 A
$I_{L1máx}$	0,2717 A
$I_{L1mín}$	0,2338 A
$L_1$	30,5923 mH
$I_{L2méd}$	1,2 A
$I_{L2máx}$	1,29 A
$I_{L2mín}$	1,11 A
$L_2$	6,4447 mH
$V_{C1méd}$	363,1992 V
$V_{C1mín}$	361,3832 V
$V_{C1máx}$	365,0152 V
$C_1$	85,1726 nF
$V_{C2méd}$	63,1992 V
$V_{C2mín}$	62,8832 V
$V_{C2máx}$	63,5152 V
$C_2$	791,149 nF
$I_{Dméd}$	1,2 A
$I_{Dmáx}$	1,5618 A
$I_{Sméd}$	252,8 mA
$I_{Smáx}$	1,5618 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	390,4391 V

### 5.5.1 Resultado de simulação

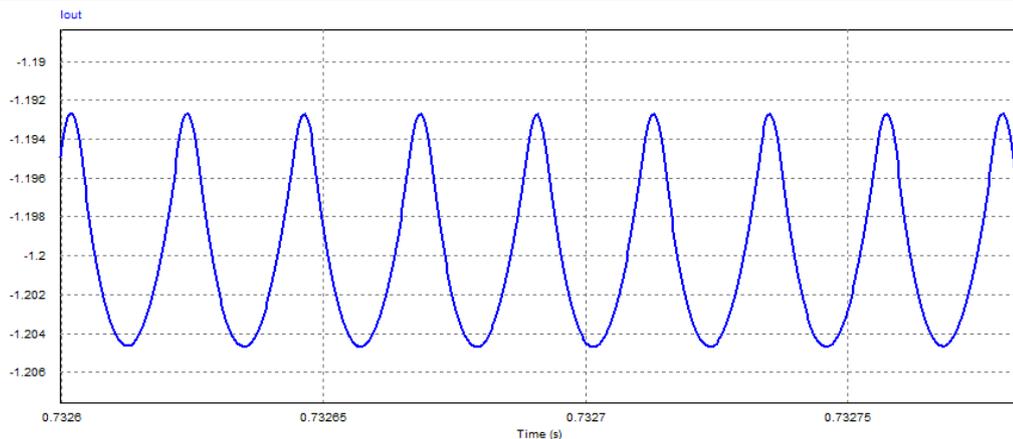
As formas de ondas descritas nas Figura 58 e Figura 59, representam as formas de onda da tensão e da corrente aplicadas na carga e as Tabela 40 e Tabela 41, seus respectivos valores.



**Figura 58: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 40: Conversor Cuk, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	-63,1992V	-63,189 V
Tensão mínima	-62,8832V	-62,813 V
Tensão máxima	-63,5152V	-63,4464V



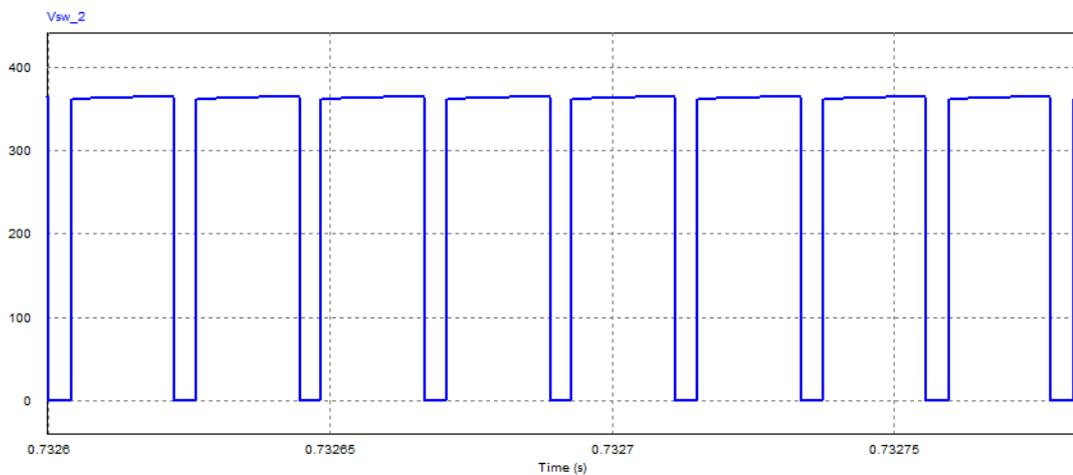
**Figura 59: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 41: Conversor Cuk, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-1,2A	-1,1986 <sup>a</sup>
Corrente mínima	-1,194A	-1,1939 <sup>a</sup>
Corrente máxima	-1,206A	-1,204 <sup>a</sup>

A topologia Cuk, atendeu as características de acionamento da carga, mantendo a ondulação de tensão e corrente dentro dos níveis aceitáveis, conforme mostra as Tabela 40 Tabela 41.

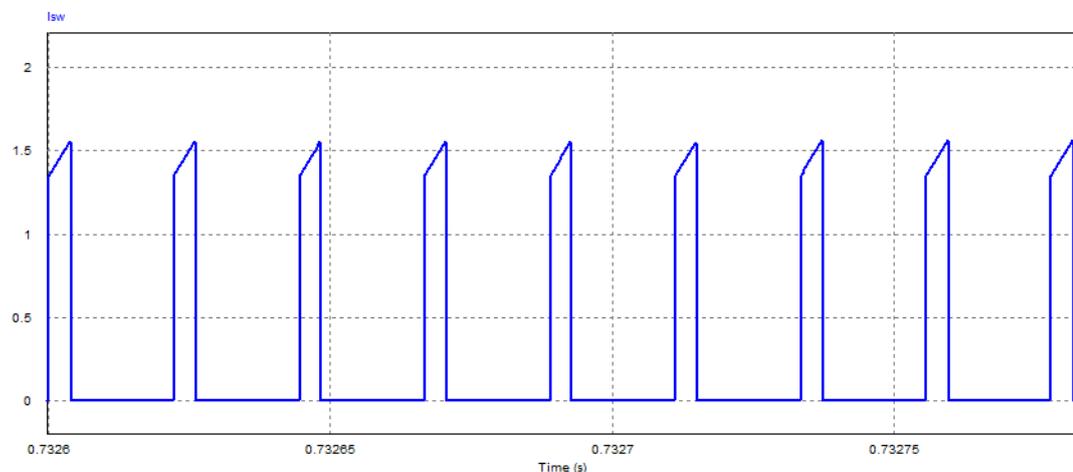
Os esforços exigidos pelos semicondutores estão representados nas Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63, que representam as formas de onda aplicadas na chave *S*, e no diodo *D*, com suas respectivas tabelas.



**Figura 60: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada na chave *S*, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 42: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado na chave *S*, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	390,4391V	389,78 V

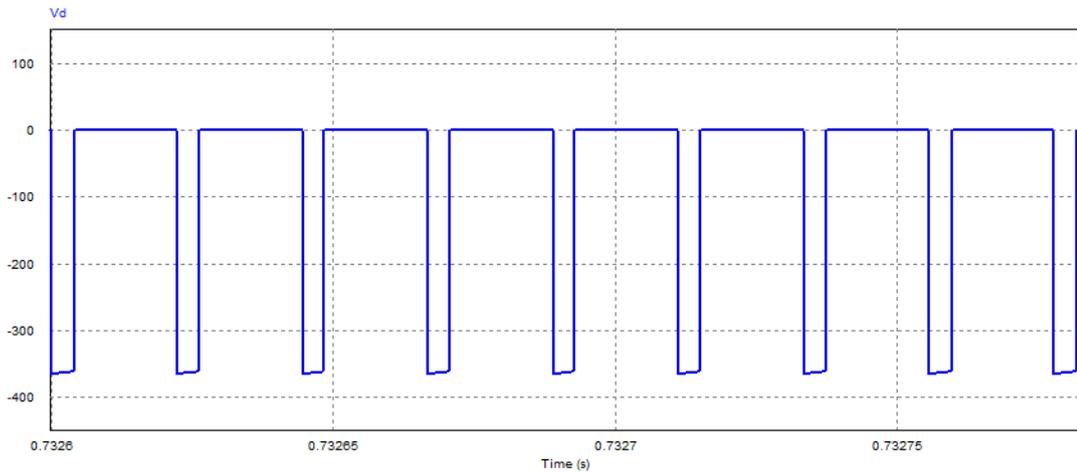


**Figura 61: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada na chave *S*, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 43: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,2528 A	0,2661 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,5618 A	1,561 A

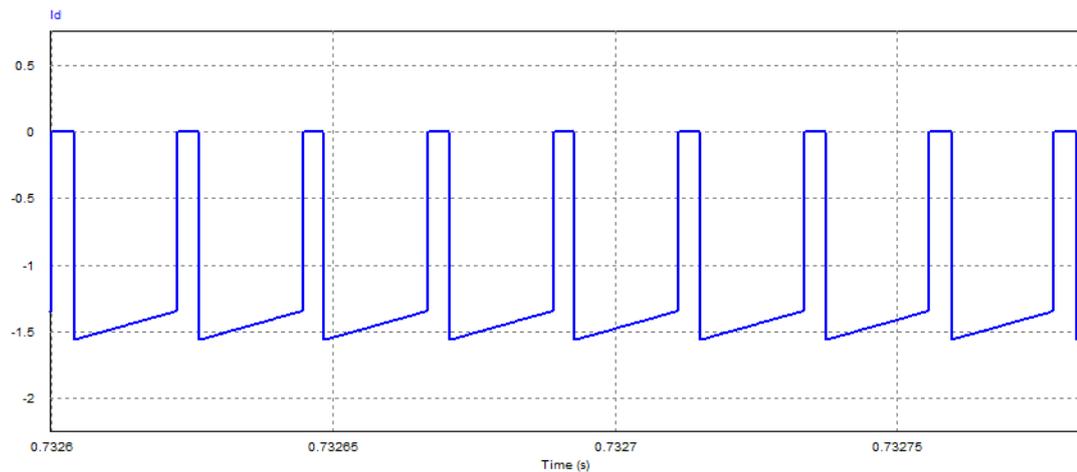
As formas de ondas das Figura 62 Figura 63, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada no diodo.

**Figura 62: Conversor Cuk, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2.**

Fonte: autoria própria.

**Tabela 44: Conversor Cuk, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	390,4391V	389,78 V

**Figura 63: Conversor Cuk, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.**

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 45: Conversor Cuk, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-1,2 A	-1,18 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	-1,5618 A	-1,5614 A

Através da análise da forma de onda da corrente no diodo descrita na Figura 63, conclui-se que o conversor projetado está operando em modo de condução contínua, devido o diodo deixar de conduzir antes que a corrente atinja um valor nulo.

Os semicondutores projetados devem suportar uma tensão máxima de 389,78 V e uma corrente máxima de 1,5614 A. Considerando que a corrente média que circula através do diodo é 1,18 A e 0,2661 A através da chave S, conforme indica as Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63 com suas respectivas Tabelas.

Deste modo, a topologia Cuk deve fornecer para o segundo projeto uma potência média de 75,828 W para a carga, com uma variação máxima de potência de 1%, o que resulta em um limite máximo de variação de potência igual a 76,5 W, o que caracteriza praticamente a mesma potência do projeto 1, sendo que pequenas alterações de valores acontecem devido as aproximações de casas decimais e o passo de simulação utilizado no programa .

Com a realização do projeto e a simulação, para a segunda configuração de carga foi possível determinar que o conversor Cuk exerce menor esforço de tensão nos semicondutores, porém exerce maiores esforços de corrente.

## 6 CONVERSOR CC-CC SEPIC

O conversor CC-CC (Single-Ended Primary Inductance Converter) ou SEPIC pode fornecer uma tensão de saída maior ou menor que sua tensão de entrada, não ocasionando a inversão de polaridade na saída (BRITTO, 2009; BARBI; MARTINS, 2006).

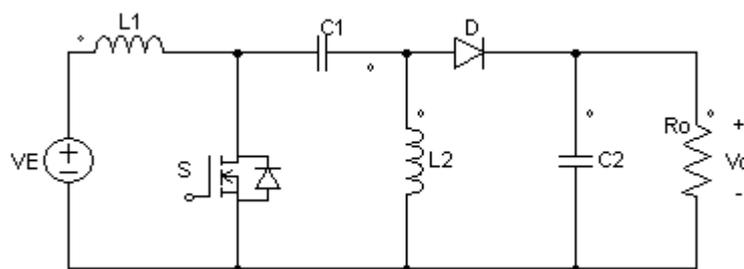
Para analisar o conversor CC-CC SEPIC representado na Figura 64 é conveniente dividi-la em dois estágios, como foi feito para os outros conversores. Portanto analisa-se o tempo em que a chave S permanece fechada e o tempo em que a chave S permanece aberta (BARBI; MARTINS, 2006; BRITTO, 2009).

Utilizando a análise de malhas proposta por Kirchhoff, obtém-se (6.1).

$$-V_E + V_{L1} + V_{C1} - V_{L2} = 0 \quad (6.1)$$

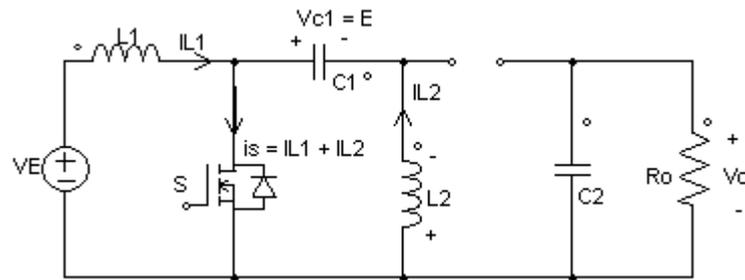
Tendo como premissa de projeto os componentes serem ideais, podemos considerar nulas as tensões nos indutores e as correntes nos capacitores, em regime permanente, reorganizando (6.1) obtém-se (6.2).

$$V_{C1} = V_E \quad (6.2)$$



**Figura 64: Conversor CC-CC SEPIC.**  
Fonte: Autoria própria.

## 6.1 ANÁLISE DA ETAPA 1



**Figura 65: Funcionamento do conversor SEPIC, para etapa 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Etapa 1 (Figura 65): a chave  $S$  está fechada, permitindo a condução da corrente elétrica pela mesma, o diodo  $D$  fica polarizado inversamente e bloqueia a condução. O indutor  $L_1$  armazena energia retirada da fonte  $VE$ . Durante esta etapa a carga é alimentada através do capacitor  $C_2$ .

As correntes oriundas da fonte  $VE$  ( $I_{L1} = I_E$ ) e do indutor  $L_2$  ( $I_{L2}$ ) crescem linearmente em uma relação  $VE/L_1$  e  $VE/L_2$  respectivamente. A corrente média que flui através da chave  $S$  é ( $I_{SW} = I_{L1} + I_{L2}$ ) e essa corrente cresce linearmente com a relação  $VE/L_{eq}$  onde  $L_{eq}$  é associação em paralelo dos indutores  $L_1$  com  $L_2$ . (BARBI; MARTINS, 2006, p. 172).

A análise e as deduções matemáticas descritas a seguir, são baseadas nas deduções dos autores (BRITTO, 2009; BARBI; MARTINS, 2006):

A tensão no indutor é definida em (6.3)

$$V_{L1} = V_E \quad (6.3)$$

Analogamente a análise anterior, porém com o intuito de determinar a tensão no indutor  $L_2$  nessa etapa, obtém-se (6.4).

$$V_{L2} = V_E \quad (6.4)$$

Por definição a tensão nos indutores é definida em (6.5) e (6.6):

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (6.5)$$

$$V_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (6.6)$$

Para obter a variação da corrente no indutor  $L_1$  isola-se  $\Delta i_{L1}$  em (6.5), o que resulta em (6.7), analogamente para  $L_2$  obtém-se (6.8).

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_E}{L_1} \cdot DT \quad (6.7)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_E}{L_2} DT \quad (6.8)$$

A tensão no diodo nessa etapa é definida em (6.9).

$$V_D = -(V_o + V_E) \quad (6.9)$$

A corrente que circula na chave  $S$  nessa etapa é definida em (6.10).

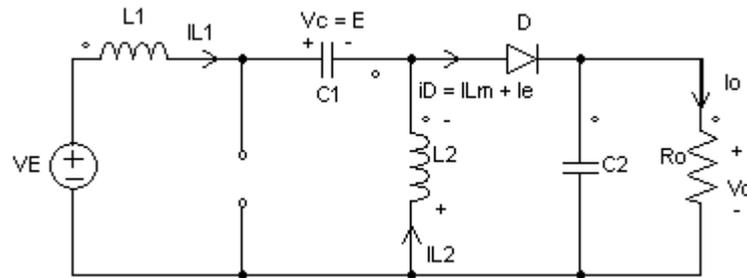
$$\Delta i_{Sw} = \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} \quad (6.10)$$

Pela análise do circuito da Figura 65 a corrente nessa etapa nos capacitores é definida em (6.11) e (6.12).

$$i_{C1} = i_{L2} \quad (6.11)$$

$$i_{C2} = -I_o \quad (6.12)$$

## 6.2 ANÁLISE DA ETAPA 2



**Figura 66: Funcionamento do conversor SEPIC, etapa 2.**  
**Fonte: Autoria própria**

Etapa 2, (Figura 66): A chave  $S$  abre impedindo a passagem da corrente elétrica, desta maneira o diodo  $D$  é polarizado diretamente e entra em condução. Os indutores transferem energia para a carga e para o capacitor  $C_2$ . A tensão sobre os indutores  $L_1$ ,  $L_2$  e do capacitor  $C_2$  assume o valor da tensão de saída  $V_o$  (BARBI; MARTINS, 2006).

As correntes  $I_{L1}$  e  $I_{L2}$  que na etapa anterior fluíam através da chave  $S$  agora atravessam o diodo  $D$  e decrescem linearmente com a relação  $-V_o/L_{eq}$  (BARBI; MARTINS, 2006).

Aplicando a lei das malhas de Kirchhoff na Figura 66, obtém-se (6.13).

$$-V_E + V_{L1} + V_{C1} + V_o = 0 \quad (6.13)$$

Substituindo (6.2) em (6.13), obtém-se (6.14).

$$V_{L1} = -V_o \quad (6.14)$$

Analogamente a análise anterior, porém com o intuito de determinar a tensão no indutor  $L_2$  obtém-se (6.15).

$$V_{L2} = -V_o \quad (6.15)$$

Por definição a tensão nos indutores é definida em (6.16) e (6.17).

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (6.16)$$

$$V_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (6.17)$$

A variação da corrente no indutor  $L_1$  e  $L_2$  é descrita em (6.18) e (6.19).

$$\Delta i_{L1} = -\frac{V_o}{L_1}(1-D)T \quad (6.18)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{-V_o}{L_2}(1-D)T \quad (6.19)$$

A tensão na chave  $S$  nessa etapa é definida em (6.20)

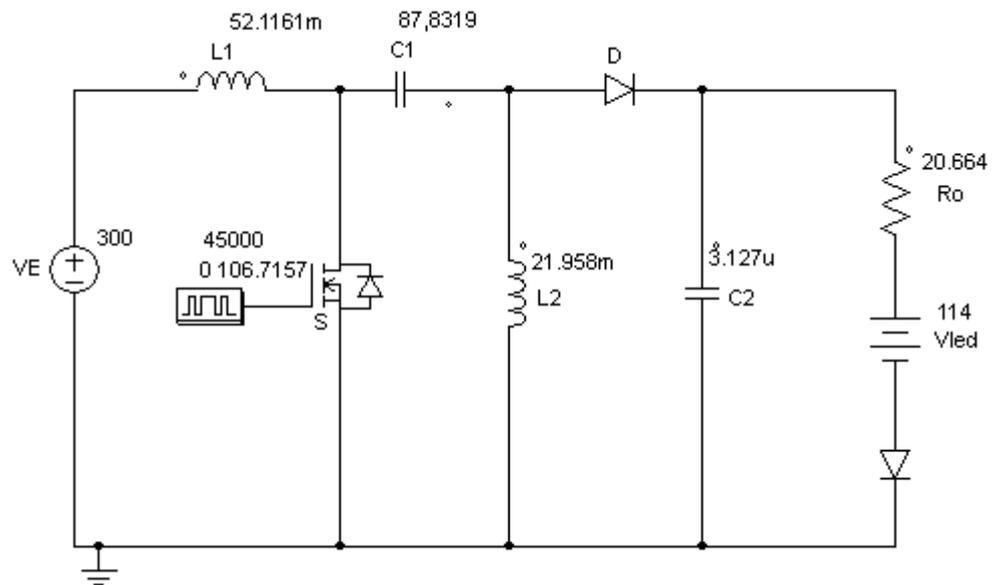
$$V_{SW} = V_E + V_o \quad (6.20)$$

Pela análise do circuito da Figura 66, a corrente no diodo é descrita em (6.21).

$$\Delta i_D = \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} \quad (6.21)$$

#### 6.4 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE

Essa seção descreve o projeto e simulação da topologia SEPIC, acionando uma matriz de 40 LEDs de potência ligados em série, que conforme o modelo elétrico do LED apresentado no Capítulo 2, resume-se na carga demonstrada na Figura 67.



**Figura 67: Conversor SEPIC acionando uma matriz de 40 LEDs de potência.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Considerando as premissas de projeto descritas na Tabela 1 e 3 do Capítulo 2, é realizado o projeto da topologia SEPIC descrito na Figura 67.

#### 6.4.1 Definição do ganho estático:

O ganho estático do conversor SEPIC é definido em (6.22).

$$D = \frac{V_o}{V_o + E} = 0,29643 \quad (6.22)$$

#### 6.4.2 Dimensionamento de $L_1$

A corrente média no indutor  $L_1$  é a mesma que a corrente média de entrada do conversor, conforme indica (6.34).

$$I_{L_1(méd)} = I_{E(méd)} = \frac{V_o I_o}{E} = 252,797 \text{ mA} \quad (6.23)$$

Já a corrente máxima é descrita em (6.24), considerando a variação de corrente no indutor 15% da corrente média no indutor.

$$I_{L_1(máx)} = I_{L_1(méd)} + \frac{\Delta I_{L_1}}{2} = 0,2717 \text{ A} \quad (6.24)$$

O indutor é calculado através de (6.25).

$$L_1 = \frac{V_E DT}{(I_{L_1(máx)} - I_{L_1(méd)})^2} = 52,1161 \text{ mH} \quad (6.25)$$

#### 6.4.3 Dimensionamento de $L_2$

A corrente média no indutor 2 é descrito em (6.26).

$$I_{L_2(méd)} = I_o = 0,6 \text{ A} \quad (6.26)$$

A corrente máxima no indutor  $L_2$  é descrita em (6.27), considerando a variação de corrente no indutor 15% da corrente média no dispositivo.

$$I_{L_2(máx)} = I_{L_2(méd)} + \frac{\Delta I_{L_2}}{2} = 0,645 \text{ A} \quad (6.27)$$

O indutor  $L_2$  é calculado através de (6.28).

$$L_2 = \frac{V_E DT}{(I_{L_2(máx)} - I_o)^2} = 21,958 \text{ mH} \quad (6.28)$$

#### 6.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_1$

O capacitor  $C_1$  é calculado através de (6.29).

$$C_1 = \frac{V_o DT}{R_o \Delta V_{C1}} = 87,8319 \text{ nF} \quad (6.29)$$

A tensão média no capacitor é descrito em (6.30).

$$V_{C1(méd)} = V_E = 300 \text{ V} \quad (6.30)$$

Portanto a tensão máxima que o capacitor está submetido é descrito em (6.31).

$$V_{C1(máx)} = V_{C1(méd)} + \frac{\Delta V_{C1}}{2} = 322,5 \text{ V} \quad (6.31)$$

#### 6.4.5 Dimensionamento do capacitor $C_2$

Analogamente a dedução do capacitor  $C_1$ , obtém-se (6.32).

$$C_2 = \frac{V_o DT}{R_o \Delta V_{C2}} = 3,127 \text{ uF} \quad (6.32)$$

A tensão média aplicada sobre o capacitor é descrita em (6.33).

$$V_{C2(méd)} = V_o = 126,3984 \text{ V} \quad (6.33)$$

Portanto a tensão máxima no capacitor é definida em (6.34).

$$V_{C2(máx)} = V_o + \frac{\Delta V_{C2}}{2} = 127,03 \text{ V} \quad (6.34)$$

#### 6.4.6 Dimensionamento da chave de potência $S$ e do diodo $D$

Aplicando a lei de Kirchhoff das malhas no circuito da Figura 67, obtém-se (6.53).

$$V_{Sw} = V_{C1} + V_{C2} \quad (6.53)$$

A tensão máxima que a chave deve suportar é descrita em (6.54).

$$V_{Swm\acute{a}x} = V_{C1m\acute{a}x} + V_{C2m\acute{a}x} = 449,53 \text{ V} \quad (6.54)$$

A corrente média e máxima na chave é descrita em (6.55) e (6.56).

$$I_{Sm\acute{e}d} = (I_{L1m\acute{e}d} + I_{L2m\acute{e}d})D = 252,7968 \text{ mA} \quad (6.55)$$

$$I_{Sm\acute{a}x} = (I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x}) = 916,7566 \text{ mA} \quad (6.56)$$

A tensão máxima de bloqueio do diodo  $D$  deduzida (6.57).

$$V_{C1m\acute{a}x} + V_{Dm\acute{a}x} + V_{C2m\acute{a}x} = 0 \quad (6.57)$$

Reorganizando (6.57), obtém-se (6.58).

$$V_{Dm\acute{a}x} = -(V_{C1m\acute{a}x} + V_{C2m\acute{a}x}) = 449,53 \text{ V} \quad (6.58)$$

A corrente média que o diodo deve suportar é descrita em (6.59).

$$I_{Dm\acute{e}d} = (I_{L1m\acute{e}d} + I_{L2m\acute{e}d})(1 - D) = \frac{V_o}{R} = 0,6 \text{ A} \quad (6.59)$$

Corrente máxima que o diodo  $D$  deve suportar é descrita em (6.60).

$$I_{Dm\acute{a}x} = I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x} = 916,7566 \text{ mA} \quad (6.60)$$

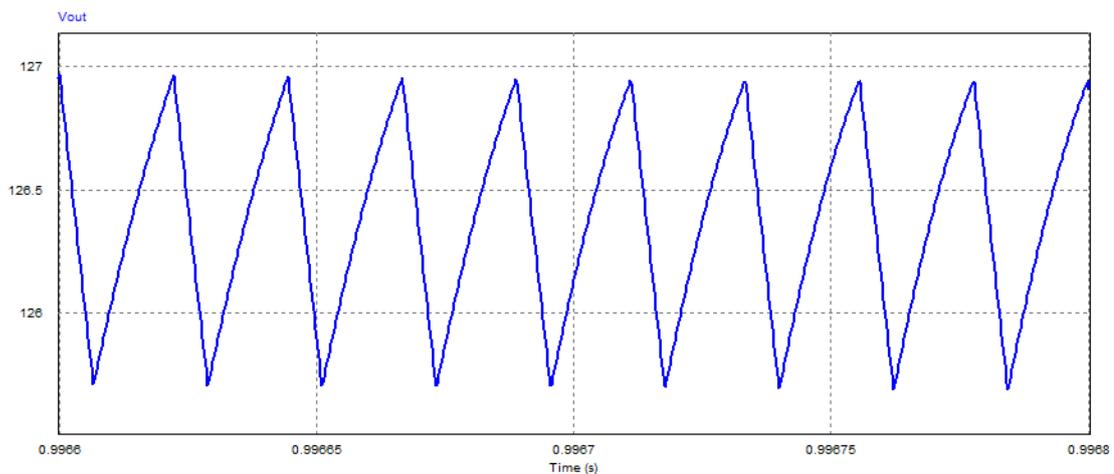
A Tabela 46 descreve o valor dos componentes calculados na etapa anterior, levando em consideração as premissas de projeto descritas no Capítulo 2.

**Tabela 46: Parâmetros para projeto do conversor SEPIC para o primeiro arranjo de LEDs.**

D	0,29643
$I_{L1méd}$	252,7968 mA
$I_{L1máx}$	271,7566 mA
$I_{L1mín}$	233,837 mA
$L_1$	52,1161 mH
$I_{L2méd}$	0,6 A
$I_{L2máx}$	0,645 A
$I_{L2mín}$	0,555 A
$L_2$	21,958 mH
$V_{C1méd}$	300 V
$V_{C1mín}$	277,5 V
$V_{C1máx}$	322,5 V
$C_1$	87,8319 nF
$V_{C2méd}$	126,3984 V
$V_{C2mín}$	125,7664 V
$V_{C2máx}$	127,0304 V
$C_2$	3,127 $\mu$ F
$I_{Dméd}$	0,6 A
$I_{Dmáx}$	916,7566 mA
$I_{Sméd}$	252,7968 mA
$I_{Smáx}$	916,7566 mA
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	449,53 V

#### 6.4.7 Resultados de simulação

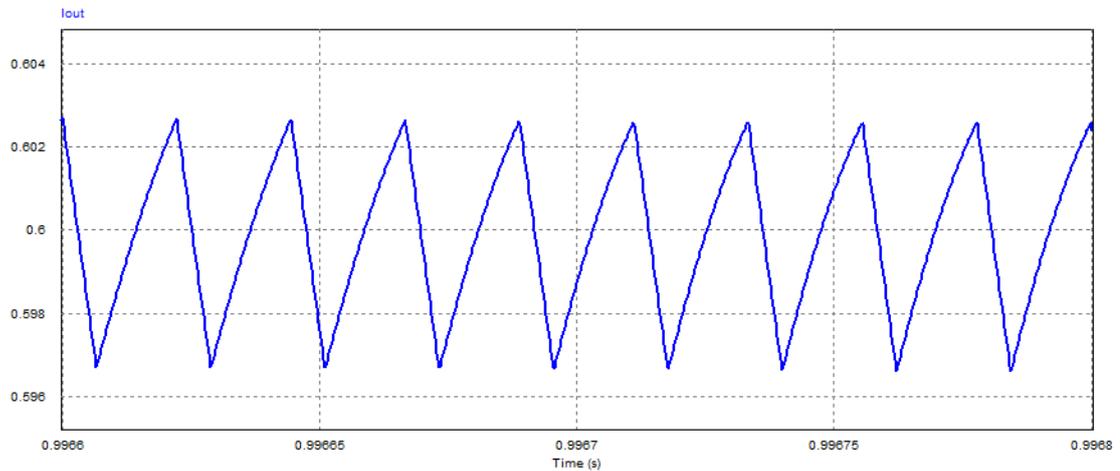
As formas de ondas aplicadas na carga são apresentadas nas Figura 68, Figura 69 e a Tabela 47 e Tabela 48, seus respectivos valores.



**Figura 68: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 47: Conversor SEPIC, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	126,398V	126,3448V
Tensão mínima	125,766V	125,7165V
Tensão máxima	127,030V	126,9525V



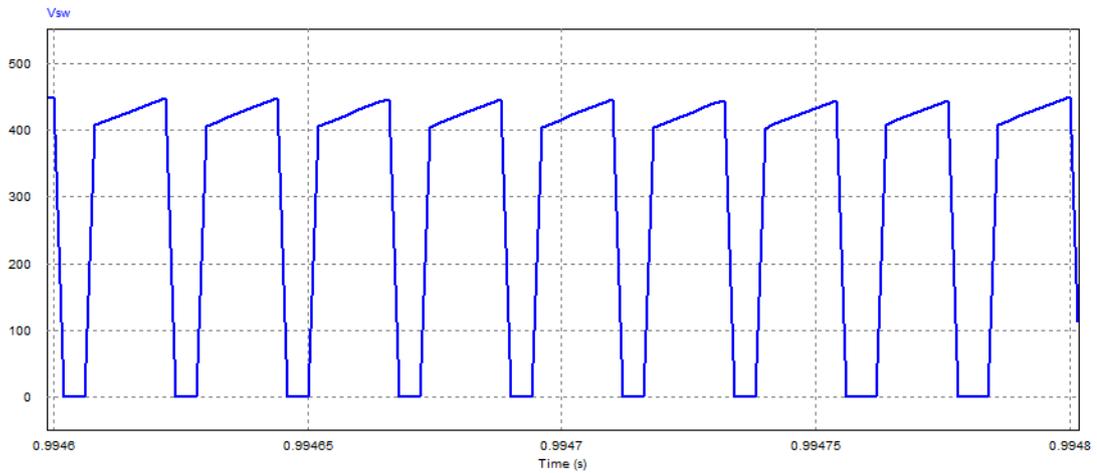
**Figura 69: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 48: Conversor SEPIC, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,6A	0,5997A
Corrente mínima	0,594A	0,5967A
Corrente máxima	0,606A	0,6026A

Como podemos observar nas Tabela 47 e Tabela 48, o conversor SEPIC, atendeu as premissas de projeto mantendo o nível de variação de corrente e tensão dentro dos especificados do projeto.

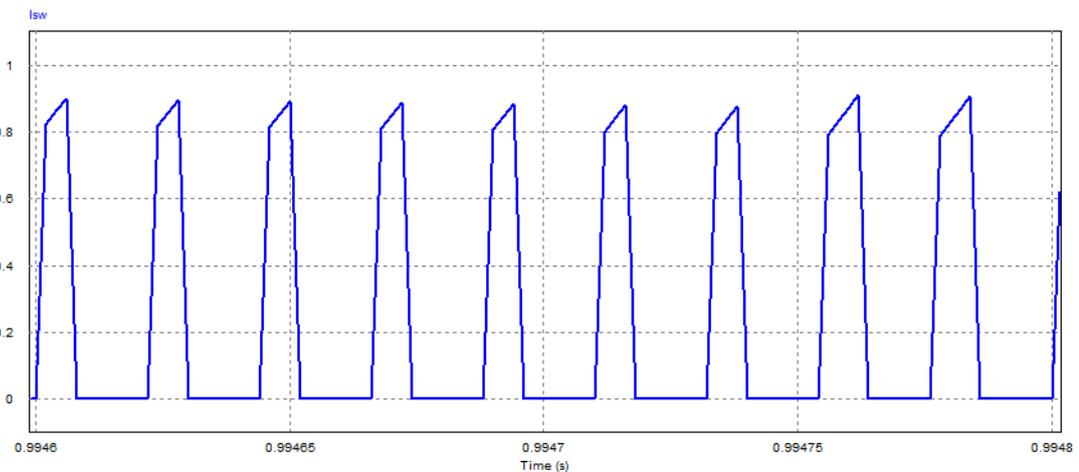
As formas de ondas apresentada nas Figura 70 e Figura 71, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada na chave S, os valores dos esforços estão descritos nas Tabela 49 e Tabela 50.



**Figura 70: Conversor SEPIC, Forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 49: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	449,53V	448,4308 V

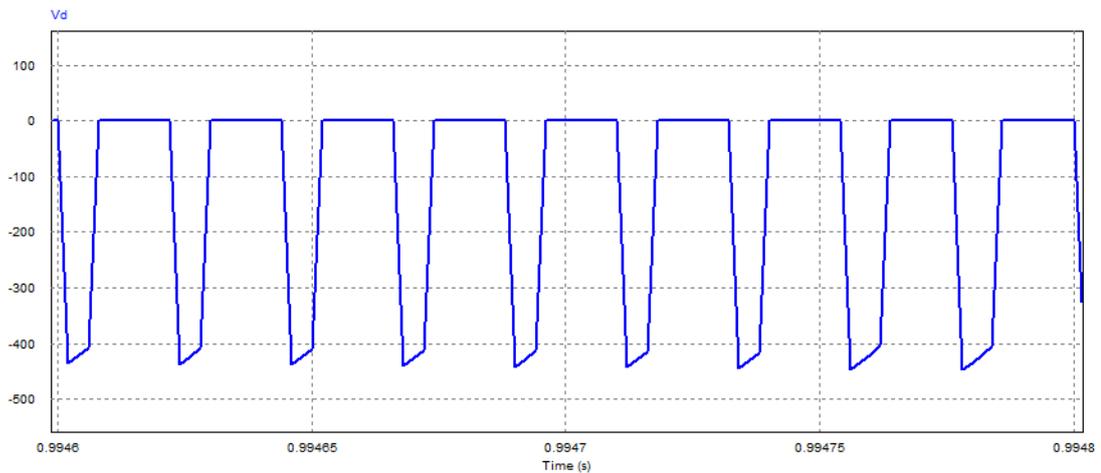


**Figura 71: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 50: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,2527	0,2473 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	0,9167 A	0,909 A

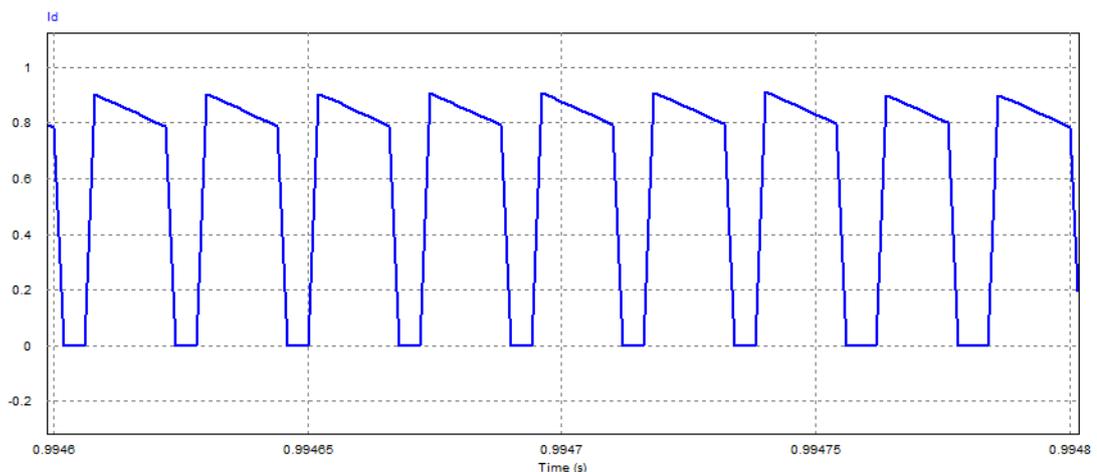
A seguir, na Figura 72 e Figura 73 são apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente, aplicada no diodo.



**Figura 72: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 51: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	-449,53 V	-447,744 V



**Figura 73: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 52: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,6 A	0,6 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	0,9167 A	0,9108 A

Observando as nas Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73 com suas respectivas Tabelas de valores projetados e simulados, percebe-se que os esforços máximos nos semicondutores, portanto os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 449,53 V e uma corrente máxima de

0,9167 A, sendo que a corrente média que circula através do diodo é 0,6 A e 0,247 A através da chave S.

Dessa maneira, a presente topologia, deve fornecer uma potência média de 75,9 W para a carga com uma variação máxima de potência de 1%, o resulta em um limite máximo de 76,6 W, o que satisfaz as especificações de projeto, que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga.

Analisando a forma de onda da corrente no diodo Figura 73, conclui-se que o conversor projetado está operando em modo de condução contínua, devido o diodo impedir a passagem da corrente elétrica antes de atingir um valor nulo.

## 6.5 PROJETO DO CONVERSOR SEPIC UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS

O projeto 2, caracteriza-se no acionamento da segunda configuração de carga para luminária, ou seja a topologia SEPIC acionando uma matriz de dois vetores de 20 LEDs ligados em paralelo, como ilustra a Figura 74.

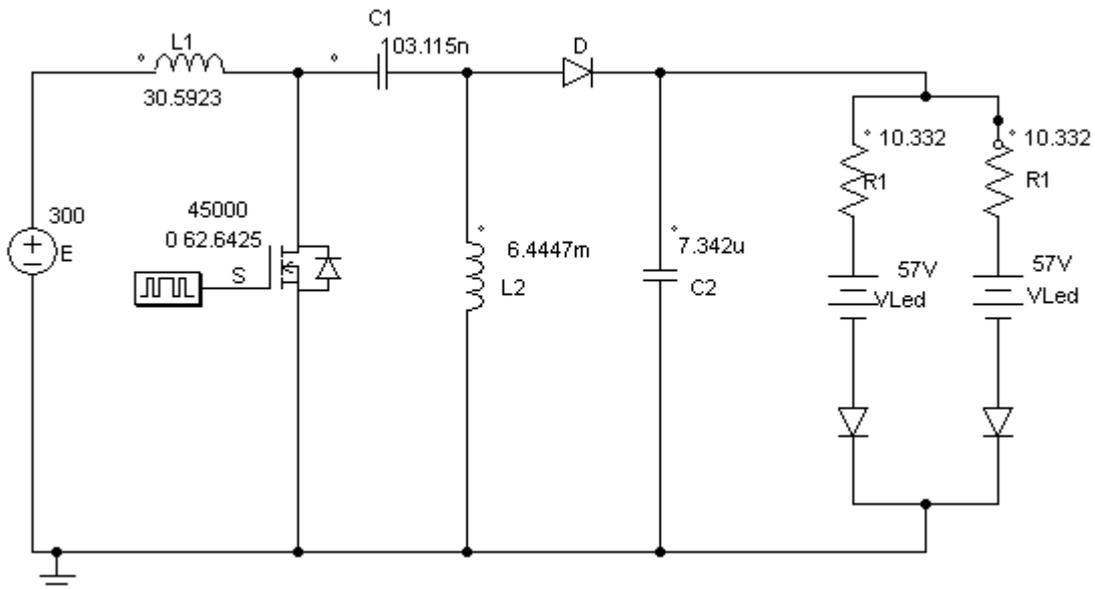


Figura 74: Conversor SEPIC acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada.  
Fonte: Autoria própria.

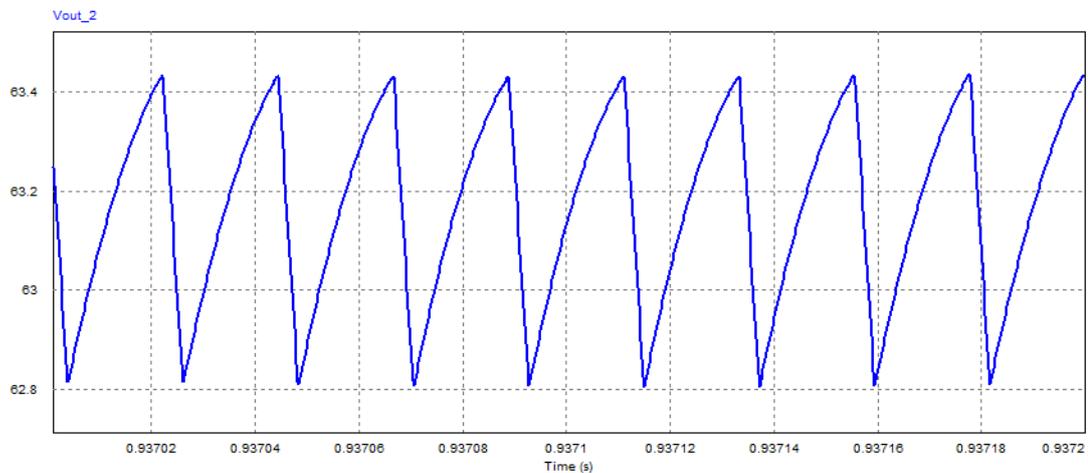
Realizando o projeto do conversor, conforme a seção anterior, porém para a carga da Tabela 2 do Capítulo 2, temos os parâmetros descritos na Tabela 53.

**Tabela 8: Parâmetros do conversor SEPIC aplicado a uma matriz com 2 vetores de LED.**

D	0,1740
$I_{L1méd}$	0,2579 mA
$I_{L1máx}$	0,2717 mA
$I_{L1mín}$	0,2338 mA
$L_1$	30,5923 mH
$I_{L2méd}$	1,2 A
$I_{L2máx}$	1,29 A
$I_{L2mín}$	1,11 A
$L_2$	6,4447mH
$V_{C1méd}$	300 V
$V_{C1mín}$	277,5 V
$V_{C1máx}$	322,5 V
$C_1$	103,115 nF
$V_{C2méd}$	63,1992 V
$V_{C2mín}$	62,8832 V
$V_{C2máx}$	63,5152 V
$C_2$	7,3422 uF
$I_{Dméd}$	1,2 A
$I_{Sméd}$	0,2528 A
$I_{Dmáx} = I_{Smáx}$	1,561 A
$V_{Dméd} = V_{Sméd}$	386,515V

### 6.5.1 Resultados de simulação

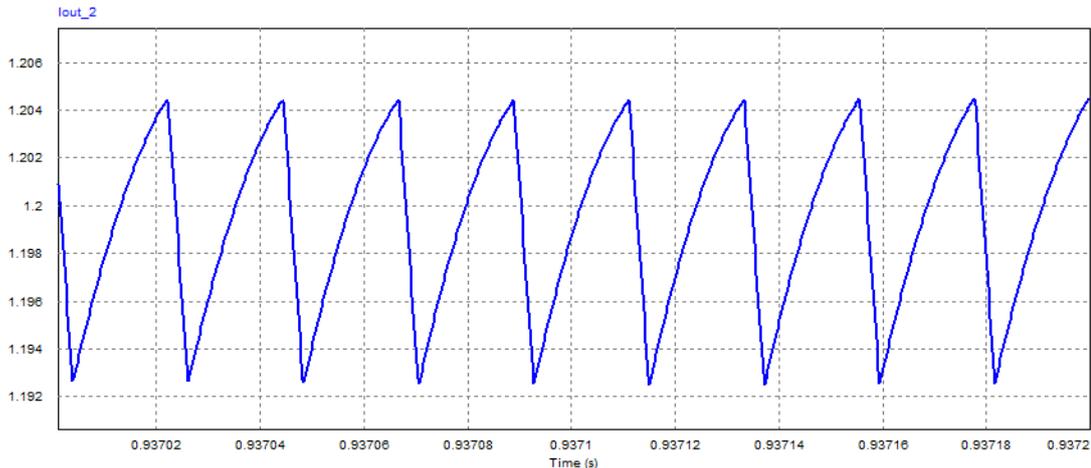
As formas de onda das Figura 75 e Figura 76 representam as formas de onda da tensão e da corrente na carga e as Tabela 53 e Tabela 54, seus respectivos valores, nesse caso foi considerado dois vetores de 20 LEDs ligados em série.



**Figura 75: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 53: Conversor SEPIC, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2.**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	63,1992V	63,169V
Tensão mínima	62,8832V	62,8217V
Tensão máxima	63,5152V	63,4223V

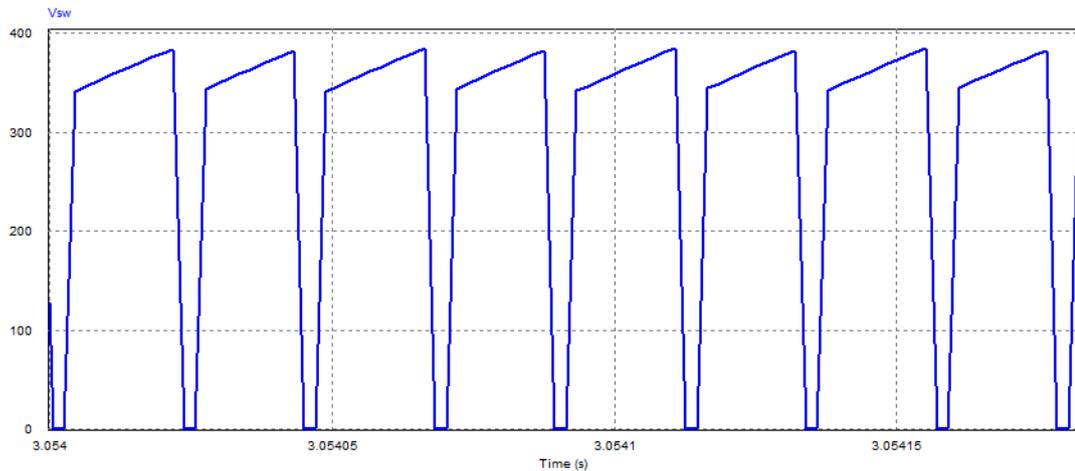
**Figura 76: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.**Tabela 54: Conversor SEPIC, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	1,2A	1,1986A
Corrente mínima	1,194A	1,1928A
Corrente máxima	1,206A	1,2050A

Para a segunda configuração de carga, o conversor CC-CC SEPIC também atendeu os requisitos de projeto, conforme mostra os resultados das simulações descritos nas Tabela 53 e Tabela 54.

A seguir, serão demonstrados nas Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 os esforços que os semicondutores são submetidos.

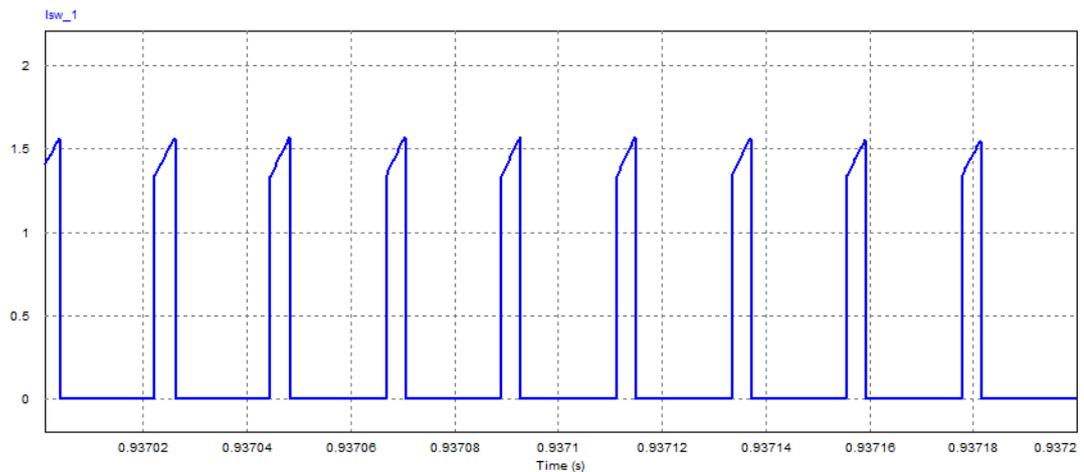
As formas de ondas apresentada na Figura 77 e Figura 78, representam a forma de onda simulada da tensão e da corrente respectivamente, aplicada na chave S e as Tabela 55 e Tabela 56 seus respectivos valores simulados e projetados.



**Figura 77: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 55: Conversor SEPIC, valores de tensão aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	386,515 V	384,88 V

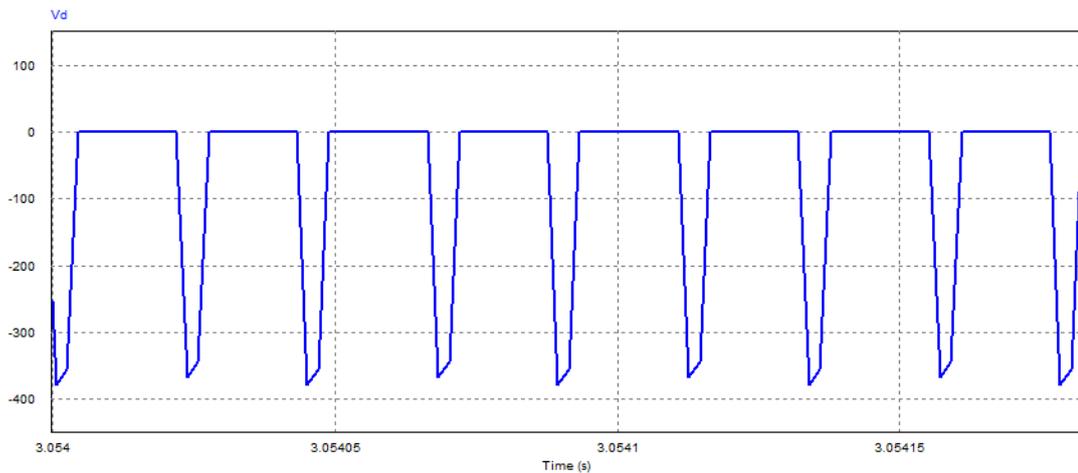


**Figura 78: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 56: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,2528	0,2467 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,5618	1,571 A

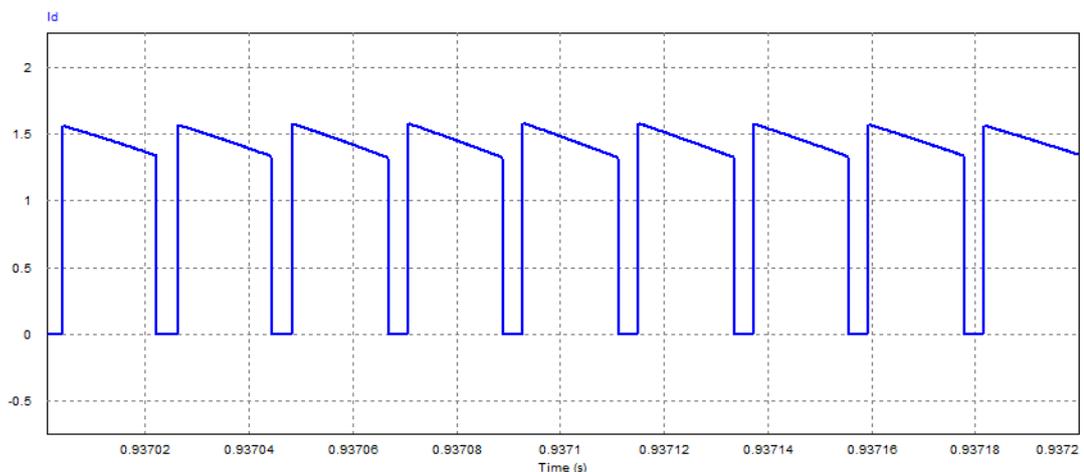
As formas de ondas apresentada na Figura 79 e Figura 80, representam a forma de onda simulada da tensão e da corrente, aplicada no diodo.



**Figura 79: Conversor SEPIC, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2.**  
 Fonte: autoria própria.

**Tabela 57: Conversor SEPIC, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	-386,515 V	-381,5 V



**Figura 80: Conversor SEPIC, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.**  
 Fonte: Autoria própria.

**Tabela 58: Conversor SEPIC, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	1,2	1,2 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,5618	1,570 A

Para provar que o conversor está operando em modo de condução contínua, analisa-se a forma de onda do diodo, descrita na Figura 80, percebe-se que o diodo deixa de conduzir antes de atingir um valor nulo, o que caracteriza o modo de condução.

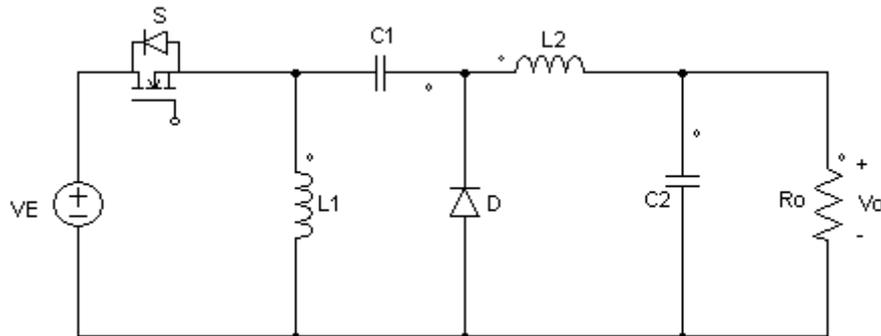
Os esforços que os semicondutores estão submetidos estão descritos nas Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 e conforme indica suas respectivas Tabelas, os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 381,5 V e uma corrente máxima de 1,57 A. Sendo que a corrente média que circula através do diodo é 1,2 A e 0,2467 A através da chave S.

Conforme indica a simulação, a topologia SEPIC deve fornecer uma potência média de 75,826 W, com limite máximo de 76,42 W, o que fica especificado dentro das condições de projeto que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga.

Com a realização do projeto e a simulação do conversor CC-CC SEPIC, foi possível determinar que o conversor SEPIC designa menores esforços de corrente nos semicondutores para a primeira configuração de carga (40 LEDs em série), no o projeto 2 comprovou-se menores esforços de tensão nos semicondutores.

## 7 CONVERSOR CC-CC ZETA

O conversor CC-CC ZETA possui as mesmas características dos conversores CUK e SEPIC, podendo abaixar ou elevar a tensão de entrada, o que muda basicamente é a distribuição dos componentes no circuito como mostra a Figura 81 (POMILIO, 2008; BARBI; MARTINS, 2006).



**Figura 81: Esquema elétrico do conversor Zeta.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A análise do conversor ZETA também é dividida em duas etapas de operação, durante um período de funcionamento.

Equacionando o circuito da Figura 81 conforme as leis Kirchhoff obtêm-se (7.1).

$$-V_{L1} - V_{C1} + V_{L2} + V_o = 0 \quad (7.1)$$

Admitindo-se que a tensão média nos indutores é nula em regime permanente obtêm-se (7.2).

$$V_{C1} = V_o \quad (7.2)$$

## 7.1 ANÁLISE DA ETAPA 1

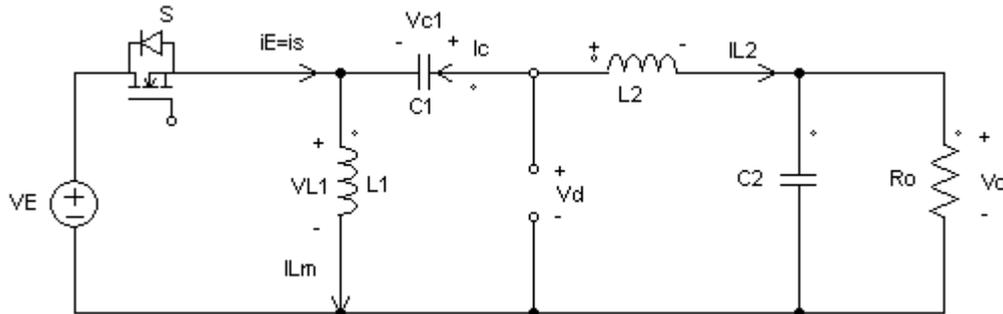


Figura 82: Funcionamento do conversor Zeta no período em que a chave S está conduzindo.  
Fonte: Autoria própria.

Etapa 1: A chave S está fechada ( $0 < t \leq DT$ ), o diodo  $D$  fica polarizado inversamente impedindo a passagem da corrente elétrica, a fonte  $VE$  fornece energia para  $L_1$  e o capacitor  $C_1$  para  $L_2$ . A corrente na chave S cresce linearmente com a relação  $VE/L_{eq}$  onde  $L_{eq}$  é a associação em paralelo dos indutores. Enquanto isso  $C_o$  é carregado, como é mostrado na Figura 82. (BARBI; MARTINS, 2006; BRITTO, 2009).

A análise e as deduções matemáticas descritas a seguir, são baseadas nas deduções do autor (BARBI; MARTINS, 2006; BRITTO, 2009)

A tensão no indutor 1 nessa etapa é definida através de (7.3)

$$V_{L1} = V_E \quad (7.3)$$

E do indutor 2 em (7.4).

$$V_{L2} = V_E \quad (7.4)$$

A tensão no diodo pode ser definida através de (7.5).

$$V_D = V_E + V_o \quad (7.5)$$

A taxa de variação da corrente nos indutores é descrita em (7.6) e (7.7).

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_E}{L_1}(DT) \quad (7.6)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_E}{L_2}(DT) \quad (7.7)$$

Já a corrente que passa nessa etapa através da chave S é descrita em (7.8).

$$i_{SW} = i_E \quad (7.8)$$

## 7.2 ANÁLISE DA ETAPA 2

Etapa 2: A chave S está aberta e não está conduzindo ( $DT < t \leq T$ ), o diodo D fica polarizado diretamente e permite a passagem da corrente elétrica, agora os indutores transferem energia para os capacitores, o sistema é ilustrado na Figura 83. (BARBI; MARTINS, 2006).

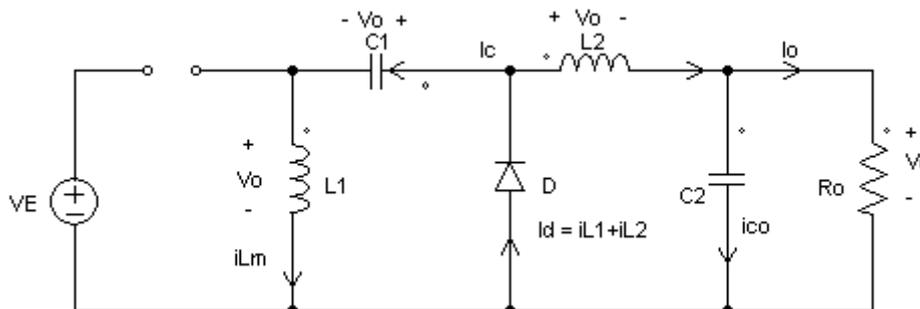


Figura 83: Funcionamento do conversor Zeta no período em que a chave S está aberta. Fonte: Autoria própria.

A tensão no indutor 1 nessa etapa é definida através de (7.9)

$$V_{L1} = -V_o \quad (7.9)$$

E do indutor 2 em (7.10).

$$V_{L2} = -V_o \quad (7.10)$$

A taxa de variação que o indutor  $L_1$  é descarregado é descrito em (7.11).

$$\Delta i_{L1} = \frac{-V_o}{L_1} (1 - D)T \quad (7.11)$$

E  $L_2$  é descrito em (7.12).

$$\Delta i_{L2} = \frac{-V_o}{L_2} (1 - D)T \quad (7.12)$$

A tensão que a chave S é submetida nessa etapa é descrita em (7.15).

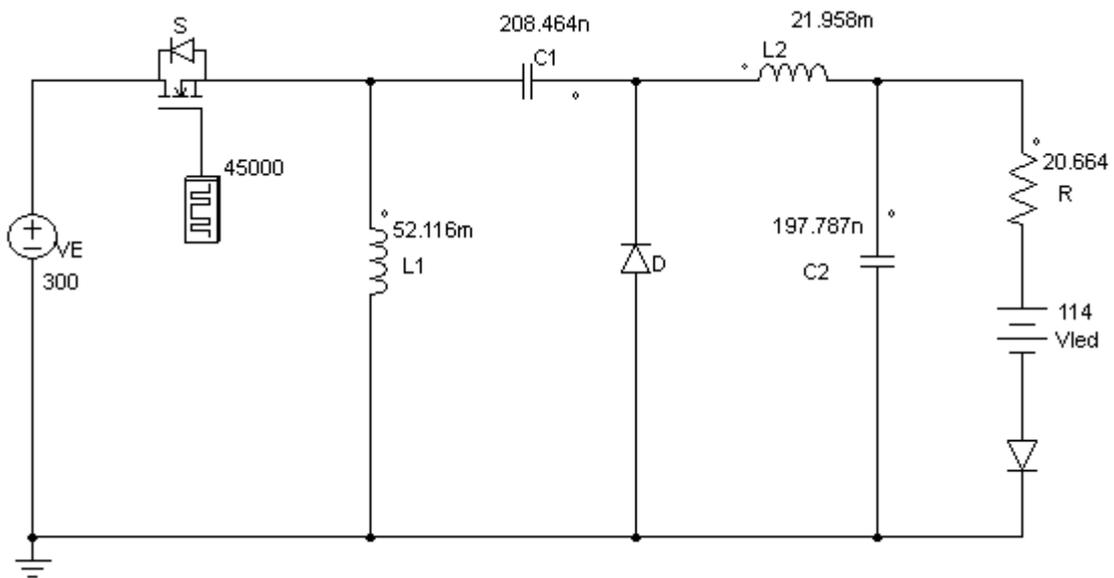
$$V_{SW} = V_E - V_{L1} \quad (7.15)$$

Analisando a Figura 83 determina-se a corrente no diodo que é descrita em (7.20).

$$\Delta i_D = \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} \quad (7.20)$$

#### 7.4 PROJETO DO CONVERSOR ZETA ACIONANDO UMA MATRIZ DE 40 LEDS EM SÉRIE

Essa seção trata-se do projeto e simulação do primeiro arranjo de carga descrito na Tabela 1 do Capítulo 2, que resulta no modelo de carga apresentado na Figura 84, para realização do projeto é necessário levar em consideração todas as premissas de projeto descritas na Tabela 1 e 3 do Capítulo 2.



**Figura 84: Projeto do conversor ZETA para uma matriz de 40 LEDs em série.**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 7.4.1 Cálculo do ganho estático

O ganho estático do conversor ZETA pode ser calculado através de (7.21).

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_E} = 0,2964 \quad (7.21)$$

#### 7.4.2 Dimensionamento do indutor $L_1$

A equação (7.22) determina-se o valor da indutância  $L_1$ , sendo que  $\Delta I_{L1}$  é 15 % do valor da corrente média no indutor  $L_1$ .

$$L_1 = \frac{V_E D}{f \Delta I_{L1}} = 52,116 \text{ mH} \quad (7.22)$$

Já a corrente média e máxima no indutor  $L_1$  são definidas em (7.23) e (7.24).

$$I_{L1(méd)} = \frac{P_E}{V_E} = I_E = 0,2528 \text{ A} \quad (7.23)$$

$$I_{L1(máx)} = I_{L1(méd)} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} = 0,2715 \text{ A} \quad (7.24)$$

#### 7.4.3 Dimensionamento do indutor $L_2$

O dimensionamento do indutor  $L_2$  é análogo ao indutor  $L_1$ . E é descrito em (7.25)

$$L_2 = \frac{-V_o(1-D)}{f\Delta I_{L2}} = 21,958 \text{ mH} \quad (7.25)$$

As correntes, média e máxima no indutor  $L_2$  são apresentadas em (7.25) e (7.26).

$$I_{L2(méd)} = \frac{P_o}{-V_o} = 0,6 \text{ A} \quad (7.26)$$

$$I_{L2máx} = I_{L2(méd)} + \frac{\Delta I_{L2}}{2} = 0,645 \text{ A} \quad (7.27)$$

#### 7.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_1$

O capacitor  $C_1$  é determinado em (7.28)

$$C_1 = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V_{C1} \cdot f} = 208,464 \text{ nF} \quad (7.28)$$

A tensão máxima é definida em (7.29)

$$V_{C1máx} = V_{C1méd} + \frac{\Delta V_{C1}}{2} = 135,878 \text{ V} \quad (7.29)$$

#### 7.4.4 Dimensionamento do capacitor $C_2$

O capacitor  $C_2$  é definido em (7.30).

$$C_2 = \frac{V_o(1-D)}{8L_2\Delta V_{C_2}f^2} = 197,787 \text{ nF} \quad (7.30)$$

A tensão média no capacitor  $C_2$  é a mesma tensão média de saída descrita em (7.31), e a máxima tensão é descrita em (7.32).

$$V_{C_2(\text{méd})} = V_o = 126,398 \text{ V} \quad (7.31)$$

$$V_{C_2(\text{máx})} = V_o + \frac{\Delta V_{C_2}}{2} = 127,03 \text{ V} \quad (7.32)$$

#### 7.4.6 Dimensionamento da chave $S$ e do diodo $D$

A corrente média que o diodo deve suportar é a soma das correntes médias dos indutores multiplicado pelo período de tempo que o diodo fica conduzindo, conforme indicado em (7.33).

$$I_{D(\text{méd})} = (I_{L1(\text{méd})} + I_{L2(\text{méd})})(1-D) = 0,6 \text{ A} \quad (7.33)$$

Analogamente, a corrente média que a chave  $S$  deve suportar é a soma das correntes médias dos indutores multiplicado pelo período de tempo que a chave permanece conduzindo, conforme indicado em (7.34).

$$I_{S(\text{méd})} = (I_{L1(\text{méd})} + I_{L2(\text{méd})})D = 252,8 \text{ mA} \quad (7.34)$$

Já a corrente máxima é a mesma para ambos os dispositivos, conforme indica a forma de onda da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a expressão (7.35).

$$I_{S(máx)} = I_{D(máx)} = I_{L1(máx)} + I_{L2(máx)} = 916,757 \text{ mA} \quad (7.35)$$

A tensão máxima que a chave S deve suportar está descrita em (7.36).

$$V_{sw(máx)} = V_E + V_{C1máx} = 427,03 \text{ V} \quad (7.36)$$

A tensão máxima de bloqueio do diodo, descrita em (7.37).

$$V_{D(máx)} = V_{C1máx} + V_E = 435,878 \text{ V} \quad (7.37)$$

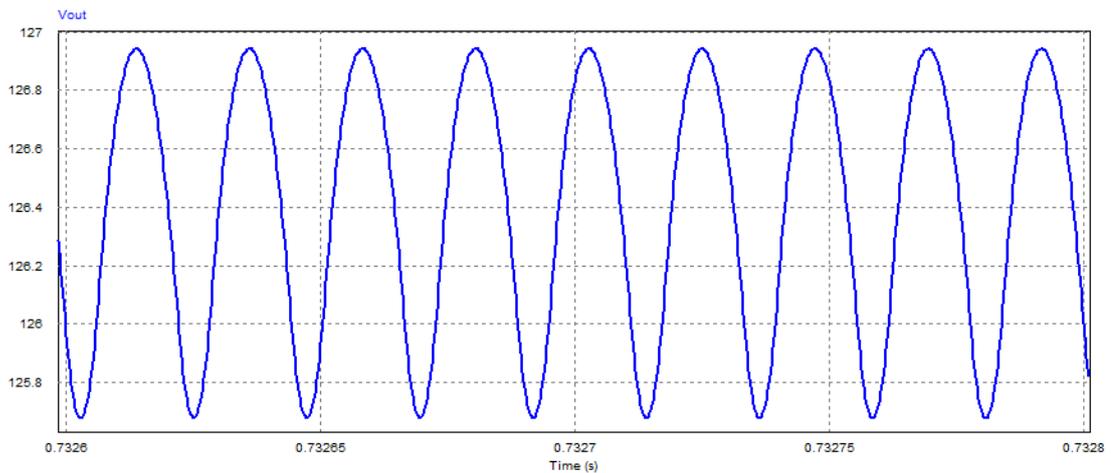
Os valores dos componentes calculados então descritos na Tabela 59, levando em consideração todas premissas de projeto descritas nas Tabelas 1 e 3 do Capítulo 2.

**Tabela 59: Parâmetros do conversor ZETA.**

D	0,2964
$I_{L1méd}$	252,797 mA
$I_{L1máx}$	271,757 mA
$I_{L1mín}$	233,837 mA
$L_1$	52,116 mH
$I_{L2méd}$	0,6 A
$I_{L2máx}$	0,645 A
$I_{L2mín}$	0,555 A
$L_2$	21,958 mH
$V_{C1méd}$	126,398 V
$V_{C1mín}$	116,919 V
$V_{C1máx}$	135,878 V
$C_1$	208,464 nF
$V_{C2méd}$	126,398 V
$V_{C2mín}$	125,7664 V
$V_{C2máx}$	127,0304 V
$C_2$	197,787 nF
$I_{Dméd}$	0,6 A
$I_{Sméd}$	0,2528 A
$I_{Dmáx} = I_{Smáx}$	0,9167 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	435,878 V

#### 7.4.7 Resultados de simulação

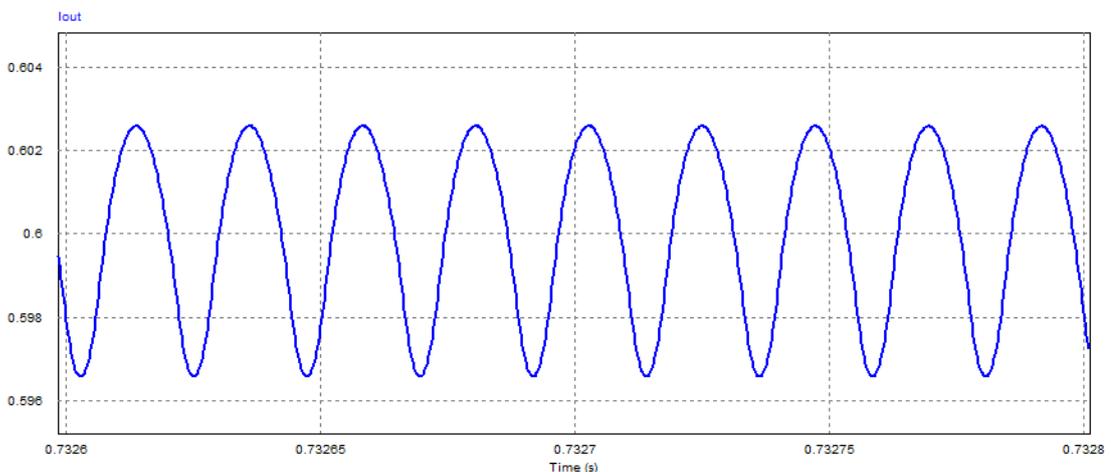
A Figura 85 e Figura 86, representam as formas de onda da tensão e da corrente na carga e as Tabelas 60 e Tabela 61, seus respectivos valores.



**Figura 85: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 60: Conversor ZETA, valores da tensão aplicada na carga, projeto 1**

	Valores Projetados	Valores do circuito Simulado
Tensão média	126,398V	126,391 V
Tensão máxima	127,030V	126,980 V
Tensão mínima	125,766V	125,678 V



**Figura 86: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

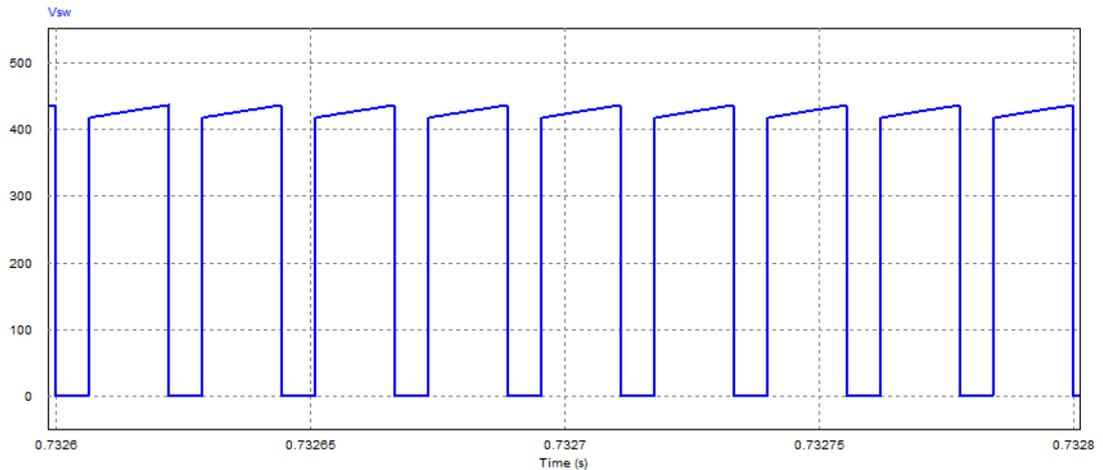
**Tabela 61: Conversor ZETA, valores da corrente aplicada na carga, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,6 A	0,5997 A
Corrente mínima	0,597 A	0,5964 A
Corrente máxima	0,603 A	0,6025 A

Através da simulação foi possível determinar que o conversor ZETA, atendeu as características de acionamento da carga, mantendo a ondulação de

tensão e corrente dentro dos níveis projetados, conforme mostra as Tabela 60 e Tabela 61.

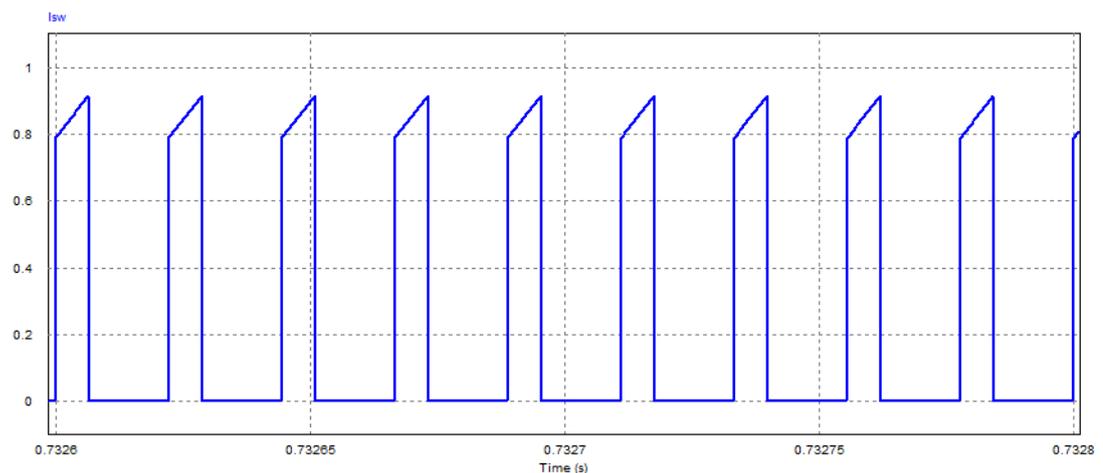
Os esforços nos semicondutores estão representados nas Figura 87, Figura 88, Figura 89 e Figura 90 com suas respectivas Tabelas.



**Figura 87: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 62: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	435,878	435,623 V

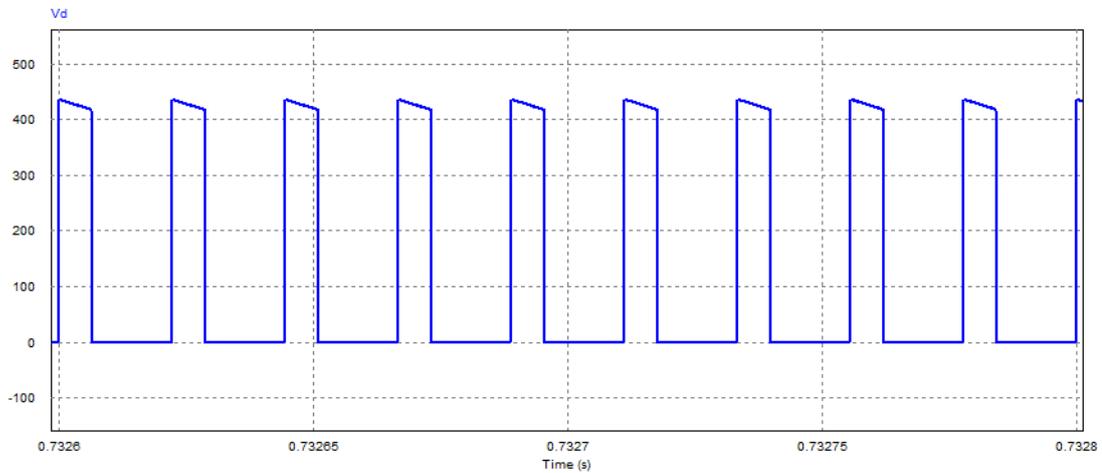


**Figura 88: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 63: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	252,8 mA	0,255 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	916,757 mA	0,9162 A

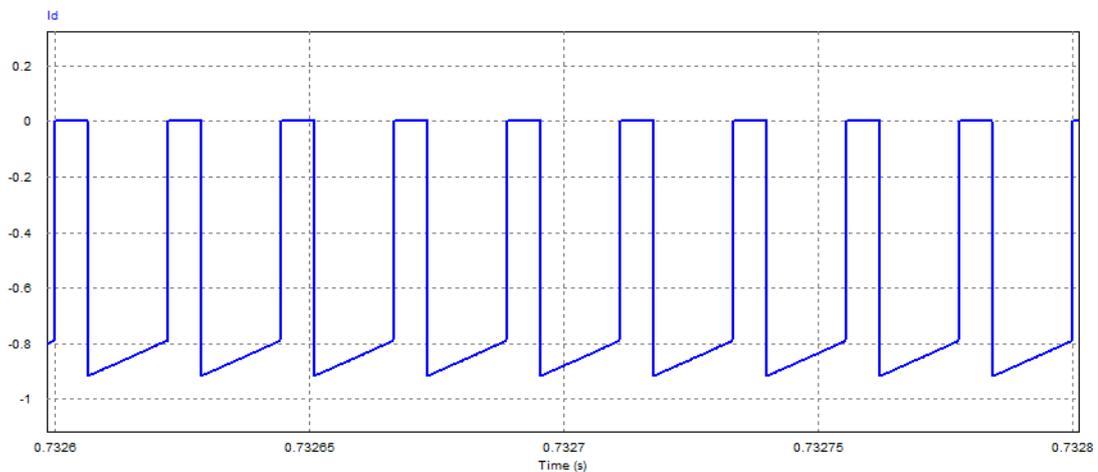
As Figura 89 e Figura 90, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente respectivamente, aplicada no diodo.



**Figura 89: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 64: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	435,878	435,6476 V



**Figura 90: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 1.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 65: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 1.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-0,6 mA	-0,598 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	-0,9167 A	-0,91629 A

Analisando a forma de onda da corrente no diodo Figura 90, é possível determinar o modo de condução do conversor, que nesse caso é o modo de condução contínua, devido a corrente cessar antes de atingir um valor nulo.

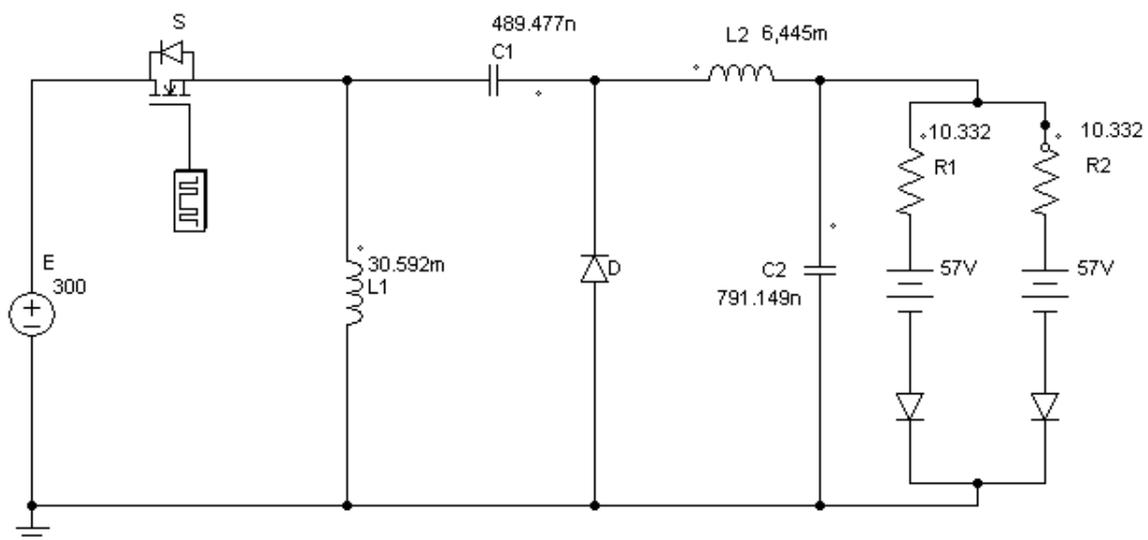
Os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 435,878 V e uma corrente máxima de 0,9167 A, sendo que a corrente média que circula através do diodo é 0,598 A e 0,255 A através da chave S, conforme indica as Tabela 62, Tabela 63, Tabela 64 e Tabela 65.

Dessa maneira, a topologia ZETA deve fornecer uma potência média de 75,829 W para a carga com uma variação máxima de potência de 76,59 W comprovando que o mesmo atende as premissas de projeto.

Esses valores são fundamentais para o estudo, que conforme descrito no Capítulo 2, será uma das condições para a escolha do conversor para representar o estágio PC.

## 7.5 PROJETO DO CONVERSOR ZETA UTILIZADO PARA ACIONAR UMA MATRIZ DE 2 VETORES EM PARALELO DE 20 LEDS

Essa seção trata do projeto do conversor ZETA aplicado para a segunda configuração de carga, descrita no Capítulo 2, que conforme o modelo elétrico do LED a carga é demonstrada na Figura 91.



**Figura 91: Conversor ZETA acionando dois vetores de 20 LEDs de potência cada.**  
Fonte: Autoria própria.

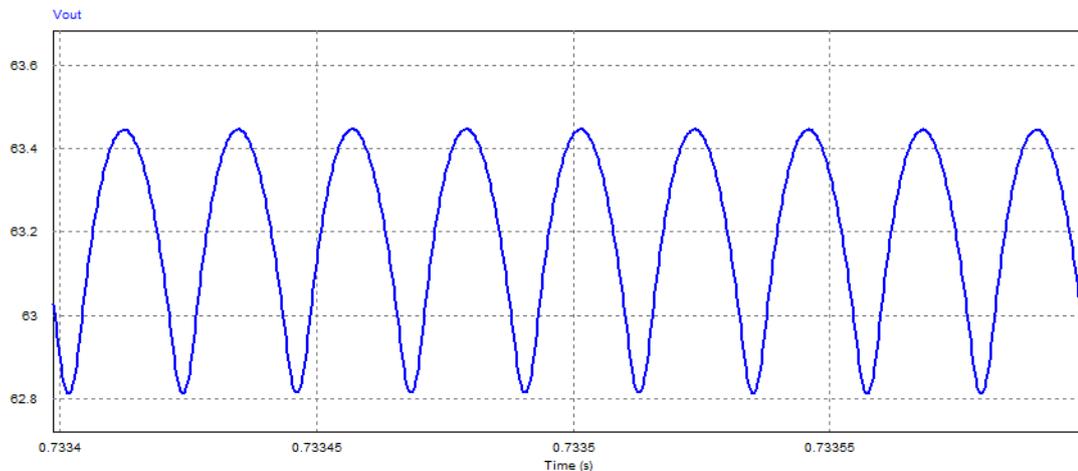
Realizando o projeto do conversor, conforme a seção anterior, porém para a carga da Tabela 2 do Capítulo 2, tem-se os seguintes parâmetros:

**Tabela 66: Parâmetros do conversor ZETA aplicado a uma matriz com 2 vetores de LED.**

D	0,174
$I_{L1méd}$	0,2528 A
$I_{L1máx}$	0,2717 A
$I_{L1mín}$	0,2338 A
$L_1$	30,592 mH
$I_{L2méd}$	1,2 A
$I_{L2máx}$	1,29 A
$I_{L2mín}$	1,11 A
$L_2$	6,445 mH
$V_{C1méd}$	63,199 V
$V_{C1mín}$	58,459 V
$V_{C1máx}$	67,939 V
$C_1$	489,477 nF
$V_{C2méd}$	63,199 V
$V_{C2mín}$	62,883 V
$V_{C2máx}$	63,515 V
$C_2$	791,149 nF
$I_{Dméd}$	1,2 A
$I_{Sméd}$	0,2528 A
$I_{Dmáx} = I_{Smáx}$	1,562 A
$V_{Dmáx} = V_{Smáx}$	367,939 V

### 7.5.1 Resultado de simulação

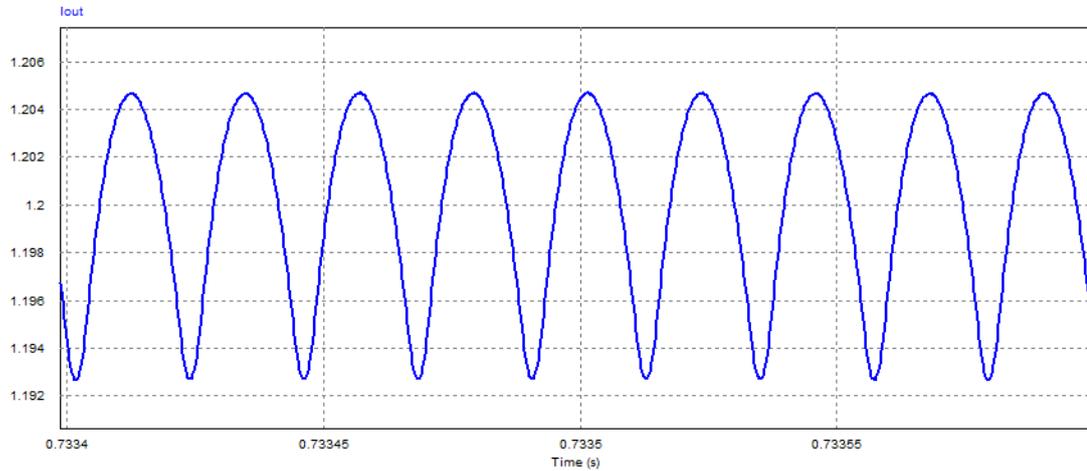
As formas de onda das Figura 92 e Figura 93, representam as formas de onda da tensão e da corrente na carga e as Tabela 67 e Tabela 68, seus respectivos valores.



**Figura 92: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na carga, projeto 2.**  
Fonte: Autoria própria.

**Tabela 67: Conversor ZETA, valores da tensão aplicada na carga, projeto 2.**

	Valores Projetados	Valores Simulados
Tensão média	63,1992V	63,196 V
Tensão mínima	62,8832V	62,871 V
Tensão máxima	63,5152V	63,450 V



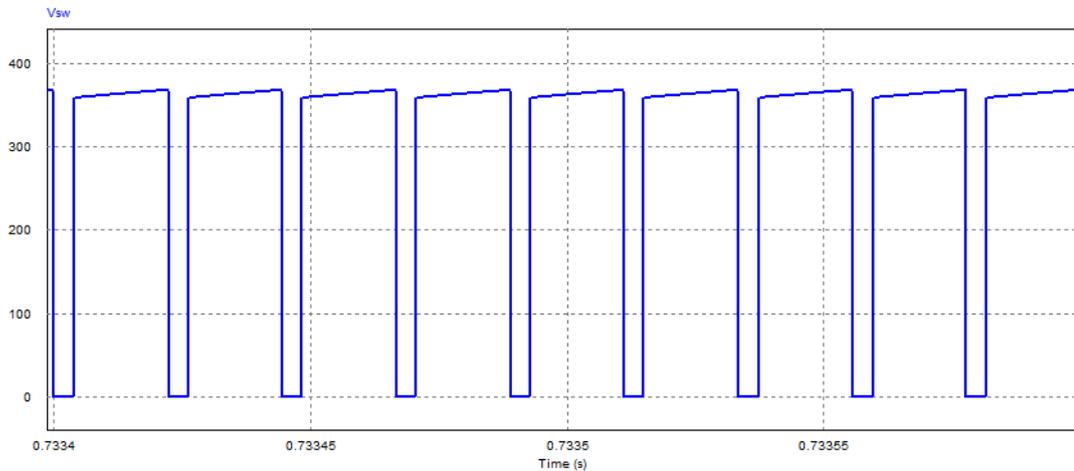
**Figura 93: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na carga, projeto 2**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 68: Conversor ZETA, valores da corrente aplicada na carga, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	1,2A	1,1939 <sup>a</sup>
Corrente mínima	1,194A	1,1927 <sup>a</sup>
Corrente máxima	1,206A	1,2046 <sup>a</sup>

Como pode ser observado nas Figura 93 e Figura 94, a topologia ZETA, acionando uma carga de dois vetores de 20 LEDs cada, manteve a ondulação de tensão e corrente na carga dentro dos níveis projetados, conforme mostra as Tabela 67 e Tabela 68.

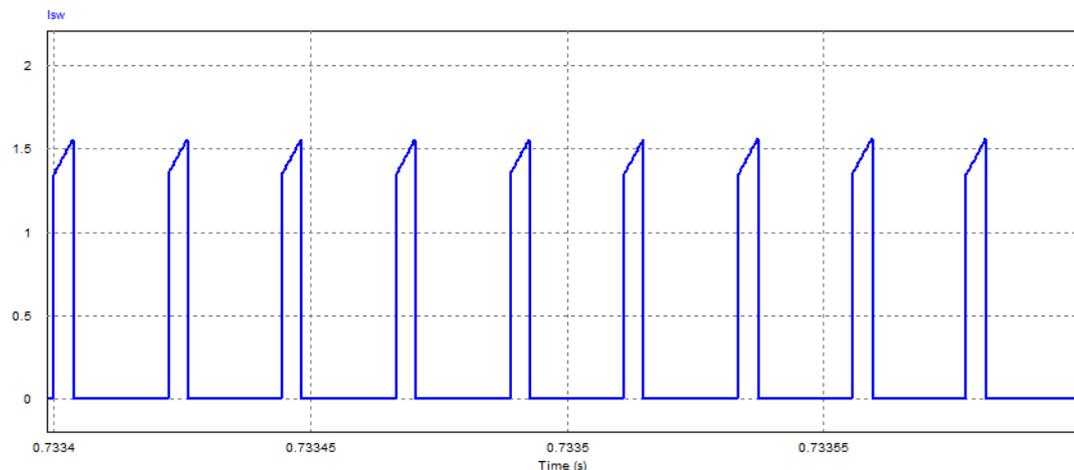
Os esforços de tensão e corrente, aplicados nos semicondutores são representados nas Figura 94, Figura 95, Figura 96 e Figura 97, os valores quantitativos estão descritos nas Tabela 69, Tabela 70, Tabela 71 e Tabela 72.



**Figura 94: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 69: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	367,939V	367,815 V

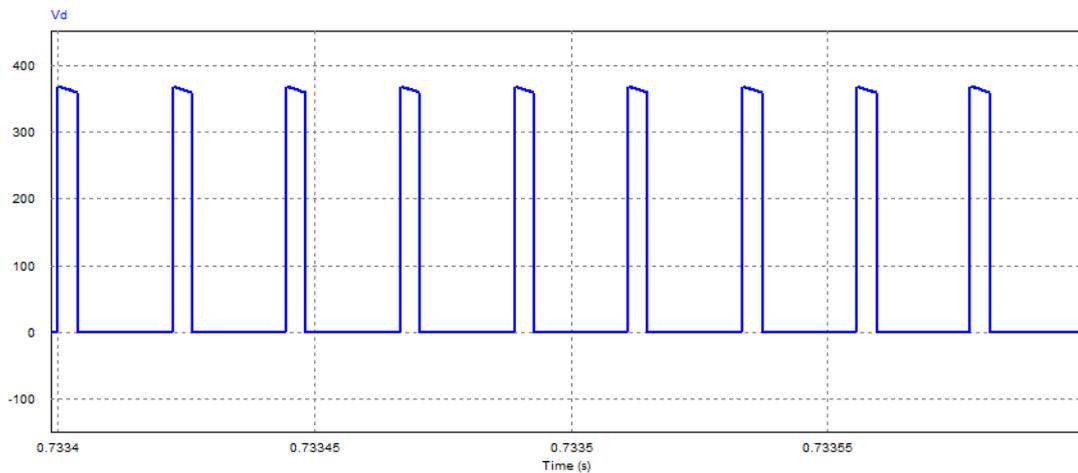


**Figura 95: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada na chave S, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 70: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado na chave S, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	0,253 A	0,2525 A
Corrente mínima	0	0
Corrente máxima	1,562 A	1,561 A

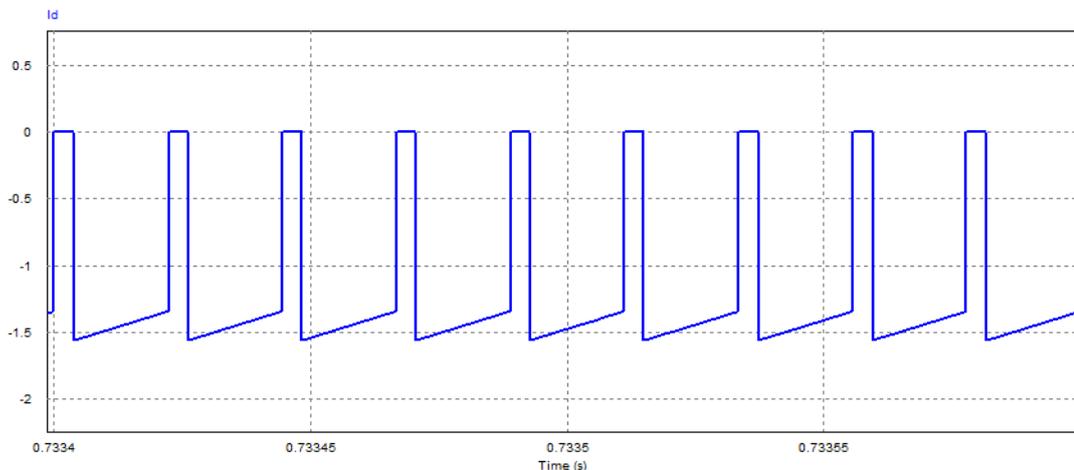
As formas de ondas apresentada nas Figura 96 e Figura 97, representam a forma de onda simulada da tensão e corrente, aplicada no diodo.



**Figura 96: Conversor ZETA, forma de onda da tensão aplicada no diodo, projeto 2.**  
**Fonte: autoria própria.**

**Tabela 71: Conversor ZETA, valor de tensão aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Tensão máxima	367,939V	367,824 V



**Figura 97: Conversor ZETA, forma de onda da corrente aplicada no diodo, projeto 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 72: Conversor ZETA, valores de corrente aplicado no diodo, projeto 2.**

	Projetado	Simulado
Corrente média	-1,2 A	-1,1996 A
Corrente máxima	0	0
Corrente mínima	-1,562 A	-1,562 A

Realizando a análise da corrente no diodo Figura 97, pode-se concluir que o conversor projetado está operando em modo de condução contínua, devido o diodo bloquear antes que a corrente atinja um valor nulo.

Os esforços máximos nos semicondutores são os mesmos para a chave *S* e o diodo *D* como indica as Figura 94, Figura 95, Figura 96 Figura 97 com suas respectivas tabelas de valores projetados e simulados. Os semicondutores escolhidos devem ser capazes de suportar uma tensão máxima de 367,939V V e uma corrente máxima de 1,562 A. Sendo que a corrente média que circula através do diodo é 1,2 A e 0,2525 A através da chave *S*.

Portanto conforme o simulado, o conversor ZETA fornece uma potência média de 75,826 W para a carga, com uma variação máxima de potência de 1%, o resulta em um limite máximo de 76,42 W, o que fica especificado dentro das condições de projeto.

Com a realização do projeto e a simulação da topologia ZETA, para o acionamento de dois arranjos de cargas, foi possível determinar que o conversor ZETA designa menores esforços de corrente nos semicondutores para a primeira configuração de carga (40 LEDs em série), no entanto a segunda configuração de carga requer menores esforços de tensão nos semicondutores.

## 8 RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma comparação quantitativa entre as topologias estudadas para representar o estágio PC do *driver*.

O quadro 1, descreve, se os conversores atenderam ou não, as premissas de projeto para as duas configurações de carga, que determina 1% de variação de tensão e corrente na carga. Nesse quesito, todos os conversores estudados obtiveram resultados satisfatórios, mantendo os níveis de tensão e corrente dentro dos projetados e conseqüentemente a potência de saída dentro dos padrões admitidos.

**Quadro 1: comparação dos conversores para atendimento a carga.**

	<i>Buck</i>	<i>Buck-Boost</i>	SEPIC	Cuk	ZETA
$\Delta P_o$	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu
$\Delta V_o$	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu
$\Delta I_o$	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu	Atendeu

A Tabela 73 descreve as equações para cálculo dos esforços máximos nos semicondutores, chave *S* e diodo *D* das topologias estudadas, lembrando que os esforços máximos são os mesmos para ambos os semicondutores para todas as topologias.

**Tabela 73: Esforços máximos na chave *S* e no diodo *D* para cada conversor.**

	$V_{m\acute{a}x}$	$I_{m\acute{a}x}$
<i>Buck</i>	$V_E$	$I_{Lm\acute{a}x}$
<i>Buck-Boost</i>	$V_E + V_{C2m\acute{a}x}$	$I_{Lm\acute{a}x}$
SEPIC	$V_{C1m\acute{a}x} + V_{C2m\acute{a}x}$	$I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x}$
Cuk	$V_{C1m\acute{a}x}$	$I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x}$
ZETA	$V_E + V_{C1m\acute{a}x}$	$I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x}$

Na Tabela 74, apresenta-se a comparação dos componentes projetados das topologias para o primeiro projeto.

Os menores indutores são utilizados nas topologias *Buck* e *Buck-boost*, o que lhes torna, mais eficientes, devido as perdas no cobre nos indutores serem diretamente proporcional ao quadrado do número de espiras, considerando que a corrente mantenha-se constante, como indica (8.1) (COLONEL, 2004).

$$P_{cu} = \frac{1}{\sigma} \frac{N^2 l_m}{A_w F_u} I_{rms}^2 \quad (8.1)$$

Onde:

$P_{cu}$ : Perdas no cobre.

$N$ : Número de espiras.

$l_m$ : Comprimento médio da espira.

$\sigma$ : Condutividade do cobre.

$A_w$ : Área da janela.

$F_u$ : Fator de utilização.

$I_{rms}^2$ : Corrente eficaz.

Já as topologias SEPIC, Cuk e ZETA apresentam os mesmos valores de indutância para ambos os indutores e devido a inserção de mais um indutor e um capacitor, essas topologias tornam-se de quarta ordem, o que dificulta uma futura inserção de um circuito de controle.

Quando comparado o capacitor de saída dos circuitos *Buck* e *Buck-Boost*, nota-se que a topologia *Buck-Boost* possui um valor maior para o devido componente. Para estudos com LEDs é de suma importância a vida útil do sistema de acionamento, pois os LEDs podem chegar a uma vida útil de 50000 horas e capacitores eletrolíticos elevados diminuem a vida útil do sistema, inviabilizando o projeto (BRITTO, 2009; CAMPONOGARA, 2012; PINTO, 2012).

**Tabela 74: Comparativo entre os componentes dos conversores estudados.**

	$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$
<i>Buck</i>	18,06 mH	-	197,78 nF	-
<i>Buck-Boost</i>	15,449 mH	-	3,127 $\mu$ F	-
SEPIC	52,116 mH	21,958 mH	87,832 nF	3,127 $\mu$ F
Cuk	52,116 mH	21,958 mH	926,93 nF	197,787 nF
ZETA	52,116 mH	21,958 mH	208,46 nF	197,78 nF

Analisando a Tabela 75 que descreve os valores dos esforços máximos nos semicondutores das topologias estudadas para a primeira configuração de carga.

As topologias Cuk, SEPIC e ZETA apresentam os maiores esforços de corrente nos semicondutores já que os mesmos devem suportar uma corrente máxima de  $(I_{L1m\acute{a}x} + I_{L2m\acute{a}x})$ .

Já as topologias Buck-boost, Cuk, SEPIC e ZETA apresentam os maiores esforços de tensão nos seus semicondutores.

Conclui-se que a topologia *Buck* exerce os menores esforços em seus semicondutores devido a chave *S* e o diodo *D* terem que suportar apenas a corrente máxima de um indutor e a tensão máxima de entrada, que nesse caso não há variação devido ser considerado um barramento contínuo de  $300V_{cc}$ , o que torna a topologia *Buck* a mais atrativa para a presente análise.

**Tabela 75: Valores dos esforços máximos nos semicondutores.**

	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
<i>Buck</i>	300	0,645.
<i>Buck-Boost</i>	426,4	0,917
SEPIC	449.5	0,917
Cuk	458,378	0,917
ZETA	435,878.	0,917

Referente à análise da segunda configuração de carga a Tabela 76 e Tabela 77, fazem um comparativo entre os componentes dos conversores estudados e dos esforços que cada topologia exerce em seus semicondutores.

**Tabela 76: Comparativo entre os componentes dos conversores estudados.**

	$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$
<i>Buck</i>	6,159 mH	-	197,78 nF	-
<i>Buck-Boost</i>	5,323 mH	-	7,342 $\mu$ F	-
SEPIC	30,592mH	6,445mH	103,12 nF	7,342 $\mu$ F
Cuk	30,592mH	6,445mH	85,173 nF	791,15 nF
ZETA	30,592mH	6,445mH	489,47 nF	791,15 nF

**Tabela 77: Valores dos esforços máximos nos semicondutores.**

	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
<i>Buck</i>	300	1,29
<i>Buck-Boost</i>	363,2	1,562
SEPIC	386,51	1,561
Cuk	390,44	1,561
ZETA	367,94	1,562

Como pode ser observado o conversor *Buck* exerce os menores esforços de tensão e corrente nos seus semicondutores e analogamente á análise feita para o projeto 1, o conversor escolhido para o projeto 2 é a topologia *Buck*.

Realizando um comparativo entre os dois projetos simulados, conclui-se que para o projeto 1 a topologia *Buck* possui um indutor com valor maior do que para o projeto 2, porém a corrente máxima que a topologia exerce nos seus

semicondutores é menor para o projeto 1, sendo que os dois projetos exercem os mesmos esforços de tensão nos seus semicondutores.

Sendo assim, devido o projeto 2 apresentar maiores esforços de corrente nos seus semicondutores conclui-se que na prática, as perdas serão maiores nos seus semicondutores e conseqüentemente apresentará um rendimento inferior ao conversor *Buck* aplicado para a primeira configuração de carga.

Portanto a topologia *Buck* é a escolhida para representar o estágio PC do circuito de acionamento de uma luminária de LEDs, aplicado para a primeira configuração de carga.

Uma avaria que poderia alterar as características do sistema, seria a queima de algum LED, que para o projeto 1 por estarem ligados todos em série resultaria em um impacto maior no sistema, mas essa questão fica para ser analisada nos estudos propostos.

## 9 CONCLUSÕES

Esse trabalho realizou um estudo comparativo entre as topologias de conversores CC-CC não isolados, para representar o estágio PC do *driver*. comparou valores de componentes projetados, variação de tensão e corrente na carga e esforços nos semicondutores.

Com a realização dos projetos e simulações foi possível determinar que todas as topologias estudadas, foram capazes de fornecer níveis adequados de tensão e corrente para a carga. Sendo que a topologia *Buck* e *Buck-Boost*, foram os conversores que apresentaram os menores componentes projetados e o conversor *Buck* a topologia que exerce os menores esforços nos seus semicondutores.

Analisando o conversor *Buck* para as duas configurações de carga, pode-se concluir que para o projeto 1 o conversor possui os menores esforços nos seus semicondutores e conseqüentemente na prática o maior rendimento quando comparado com o projeto 2.

Portanto conclui-se que a topologia escolhida para representar o estágio PC, do driver de acionamento de duplo estágio para uma luminária de LED para iluminação pública é a topologia *Buck* aplicada para a primeira configuração de carga.

Para futuros trabalhos pode ser realizado o estudo do sistema em malha fechada tendo como objetivo o controle do fluxo luminoso dos LEDs, estudo de avarias no sistema como queima de componentes e estudo de substituição do duplo estágio do *driver* por conversores de duplo estágio integrados que conforme a literatura indica, possibilitam uma diminuição do capacitor de barramento. (SIMÕES, 2012; CAMPONOGARA, 2012).

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- ALMEIDA, Pedro S. **Conversor integrado SEPIC BUCK-BOOST aplicado ao acionamento de LEDs de potência em iluminação pública**. 2012. 158p. dissertação - Engenharia elétrica, universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora -MG, 2012.
- BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Conversores CC-CC Básicos nao isolados**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2006. 367 p.
- BRITTO, Jonas R. D. **Análise, projeto e implementação de conversores CC-CC com ampla faixa de conversão aplicados em iluminação de estado sólido**. 2009. 216p. Tese - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- CAMPONOGARA, Douglas. **Análise e projeto de uma topologia de dois estágios otimizada aplicada à iluminação com LEDs**. 2012. 88p. Dissertação - Mestrado em engenharia elétrica- Universidade Federal de Santa Maria, Santa maria, 2012.
- CLAUDIO R. B. S. RODRIGUES, Pedro S. A. D. P. P. E. H. A. C. B. **Emprego de LEDs como alternativa para sistemas de iluminação pública**. 14p. artigo - [s.n.].
- COLONEL, Wm. T. M. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 3°. ed. Idyllwild: Marcel Dekker, 2004.
- COPEL DISTRIBUIÇÃO. **Copel**. Disponível em: <[www.copel.com](http://www.copel.com)>. Acesso em: 2015 abr. 24.
- HART, Daniel W. **Electrónica de Potencia**. Madri: Pearson Educación, 2001.
- MELLO, Luiz F. P. D. **Projeto de Fontes Chaveadas - Teoria e Prática**. 1. ed. [S.l.]: érica, 2011.
- NOVICKI & MARTINEZ, Jackson M. & R. **LEDS para Iluminação Pública**. 2008. 9p. artigo - Engenharia elétrica - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- PHILIPS. Philips. **Site da Philips Technical Datasheet DS64**. Disponível em: <[www.philips.com.br](http://www.philips.com.br)>. Acesso em: 28 Março 2014.
- PINTO, Rafael. **Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) Alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias**. 2012. 239p. Tese - Doutorado em engenharia elétrica, Universidade Federal De Santa Maria, Santa maria, 2012.
- POMILIO, José A. **José Antenor Pomilio**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>>. Acesso em: 20 Abril 2015.
- POMILIO, José A. **Fontes Chaveadas**. Campinas: FEEC, 2008.
- RASHID, Muhammad H. **Power Electrocics**. 3. ed. Pensacola: Elsevier, v. 3, 2011.

S.M.DECKMANN E J. A.POMILIO. **dsce unicamp**. Disponível em:  
<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a3.pdf>>. Acesso em: 27 março 2015.

SÁ JUNIOR, Edilson M. **Estudo de Estruturas de Reatores Eletrônicos para LEDs de Iluminação**. 2010. 175p. Tese - Doutorado em engenharia elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SIMÕES, Cláudio R. B. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública**. 2012. 216p. tese - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

SINOCO. **Sinoco Lighting**. Disponível em: <<http://sinoco-led.com.br/>>. Acesso em: 2015 abr. 24.