



# RETIFICADOR SEPIC PFC ASSOCIADO A UM INVERSOR HALFBRIDGE PARA O ACIONAMENTO DE LEDS DE POTÊNCIA CA

**LUIZ HARUKI OKIDA**

novembro de 2017

# Retificador SEPIC PFC Associado a um Inversor Halfbridge para o Acionamento de LEDs de Potência CA

LUIZ HARUKI OKIDA



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Telecomunicações

**2017**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Luiz Haruki Okida, Nº 1160388, 1160388@isep.ipp.pt

Orientação científica: Claudinor Bitencourt Nascimento, claudinor@utfpr.edu.br

Supervisão: Rui Chibante, rmc@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Telecomunicações

**2017**



Dedico este trabalho a minha mãe Marcia, ao meu pai Sergio e a minha irmã Caroline.



## *Agradecimentos*

Agradeço aos meus pais e a minha irmã.

Agradeço os meus professores orientadores Prof Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento e ao Prof Dr. Rui Chibante pelo apoio assim foi possível a realização deste trabalho.

Agradeço a Prof Dra. Fernanda Cristina Correa, pelos auxílios prestados.

Agradeço aos meus colegas e amigos da UTFPR campus Ponta Grossa e do ISEP.



## *Resumo*

O uso de lâmpadas LEDs de corrente alternada (CA) é considerada uma boa solução para a sistemas de iluminação. Algumas características como alta queda de tensão e uma baixa corrente de transmissão através de uma resistência, permite que os LEDs CA sejam conectados diretamente a uma fonte. Entretanto o LED produz uma alta distorção harmônica na corrente de entrada, não cumprindo os requisitos exigidos pela norma IEC 61000-2-3 classe C. O objetivo deste trabalho é a apresentação de um sistema de potência eletrônica com correção do fator de potência (PFC) para alimentar as lâmpadas LED CA. O conversor SEPIC operando em MCD é responsável pela correção do fator de potência e a regulação do barramento CC. A alimentação em corrente alternada é feita pelo inversor Half-Bridge onde os mosfets são comandados através de uma modulação com pulsos assimétricos, como por exemplo: a modulação I-LFSQW (*Low Frequency Square Wave Current*). De forma alternativa ao estudo do conversor SEPIC MCD são estudados os conversores SEPIC MCCr (Modo de Condução Crítica) e Boost MCCr, para a correção de fator de potência e regulação do barramento CC.

### *Palavras-Chave*

Correção do Fator de Potência, SEPIC, Modo de Condução Descontínuo, LEDs, Inversor de Frequência.



## *Abstract*

The use of LEDs that operate on alternating current (AC) has been considered a good solution for lighting system applications. With high direct breakdown voltage and lower driving current through a resistor element, the AC LED can be connected directly to a supply source. However, this produces a high harmonic distortion in the input current, not meeting with the requirements of the IEC 61000-2-3-class C Standard. This way, this thesis presents a power electronic system with Power Factor Correction (PFC) to drive AC power LEDs. The PFC and the DC bus voltage regulation is carried out by a SEPIC converter operating on DCM (Discontinuous Conduction Mode). AC power is supplied by the Half-Bridge Voltage Inverter operation with asymmetric command pulses, i.e., using I-LFSQW (Low Frequency Square Wave Current) technique. As an alternative to the SEPIC DCM, the SEPIC BCM (Boundary Conduction Mode) and Boost BCM rectifiers are studied to PFC and DC bus regulation.

### *Keywords*

Power Factor Correction, SEPIC, Discontinuous Conduction Mode, LEDs, Inverter.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS .....	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1.FATOR DE POTÊNCIA E TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA .....	5
2.2.MÉTODOS PARA A CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA .....	9
2.3.RETIFICADOR SEPIC MCD.....	13
2.4.RETIFICADOR SEPIC MCCr.....	23
2.5.CONVERSOR BOOST EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICO.....	26
2.6.INVERSOR DE MEIA PONTE .....	27
2.5. I-LFSQW.....	32
2.6. LÂMPADAS LED .....	33
<b>3. METODOLOGIA, MATERIAIS E PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC</b> .....	<b>37</b>
3.1.PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC EM MCD .....	38
3.2.RESULTADOS DO PROJETO DO CONVERSOR SEPIC EM MCD .....	42
3.3.PROJETO DOS INDUTORES LI E LO SEPIC .....	43
3.4.ESQUEMA ELÉTRICO, MONTAGEM E COMPONENTES .....	46
<b>4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O CONVERSOR SEPIC EM MCD</b> .....	<b>49</b>

<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONVERSOR SEPIC MCD .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>CONFRONTO DOS RESULTADOS SEPIC MCD.....</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS CONVERSOR SEPIC MCCR.....</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS RETIFICADOR BOOST MCCR .....</b>	<b>97</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>105</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1. Circuito de um LED CA com uma resistência limitadora e as suas formas de onda de tensão e corrente de entrada.	2
Figura 2. Triângulo Retângulo da Potência.	6
Figura 3. Tetraedro das potências.	8
Figura 4. Topologia “otimizada” para um retificador de fase única.	11
Figura 5. Uso de condensador para aumento do fator de potência.	11
Figura 6. Representação do conversor SEPIC e a convenção dos sentidos das correntes e as polaridades de tensões.	14
Figura 7. Primeira Etapa de Operação no MCC.	15
Figura 8. Segunda Etapa de Operação no MCC.	15
Figura 9. Principais Formas de Onda de Tensão do Conversor SEPIC em Modo de Condução Contínua.	16
Figura 10. Principais Formas de Onda de Corrente do Conversor SEPIC no MCC.	17
Figura 11. Terceira Etapa de Condução no MCD.	20
Figura 12. Principais formas de onda de tensão do conversor SEPIC em MCD.	20
Figura 13. Principais formas de onda de corrente do conversor SEPIC em MCD	21
Figura 14. Primeira etapa de condução do conversor SEPIC em modo de condução crítica.	23
Figura 15. Segunda etapa de condução do conversor SEPIC em modo de condução crítica.	24

Figura 16. Formas de Corrente do Interruptor e do Díodo do retificador SEPIC em MCCr. 25

Figura 17. Formas de Corrente dos Indutores  $L_o$  e  $L_i$  do conversor SEPIC em MCCr. 25

Figura 18. Corrente de Pico do Interruptor Q1 do SEPIC em MCCr. 26

Figura 19. Representação do acionamento do interruptor no Boost. 27

Figura 20. Primeira etapa de condução do inversor de meia ponte. 28

Figura 21. Segunda etapa de condução do inversor de meia ponte. 28

Figura 22. Saída de Tensão e Corrente do Inversor de meia ponte para carga resistiva. 29

Figura 23. Primeira etapa de condução para carga RL. 29

Figura 24. Segunda etapa de condução para carga RL. 30

Figura 25. Terceira etapa de condução para carga RL. 31

Figura 26. Quarta etapa de condução para carga RL. 31

Figura 27. Forma de tensão e corrente sobre a carga RL. 32

Figura 28. Modulação I-LFSQW. 33

Figura 29. Modelo elétrico de um LED. 33

Figura 30. Ilustração da recombinação e da emissão de fótons Fonte: SÁ JUNIOR, (2007)

34

Figura 31. Exemplos dos caminhos percorridos pelos elétrons em elétrodos: convencional (a), modificado (b). Fonte: SÁ JUNIOR, (2007) 35

Figura 32. Exemplos de geometria de contatos em LED. Fonte: SÁ JUNIOR, (2007) 35

Figura 33. Topologia integrada de um retificador SEPIC e um inversor de meia ponte 38

Figura 34. Esquema elétrico do SEPIC em MCD com a topologia integrada. 47

Figura 35. Protótipo da topologia integrada.	47
Figura 36. Circuito do conversor SEPIC em MCD.	50
Figura 37. Tensão e Corrente de entrada do conversor SEPIC MCD, a corrente foi amplificada cem vezes para uma melhor visualização.	50
Figura 38 Corrente que percorre o indutor $L_i$ em baixa frequência do conversor SEPIC MCD.	51
Figura 39 Corrente que percorre o indutor $L_i$ em alta frequência do conversor SEPIC MCD.	51
Figura 40. Corrente do indutor $L_o$ em baixa frequência do conversor SEPIC MCD.	52
Figura 41. Corrente dos indutor $L_o$ em alta frequência do conversor SEPIC MCD.	52
Figura 42. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC MCD.	53
Figura 43. Corrente no Condensador $C_i$ do conversor SEPIC MCD.	53
Figura 44. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC MCD.	54
Figura 45. Tensão Sobre o Indutor $L_i$ do conversor SEPIC MCD.	55
Figura 46. Tensão sobre o Indutor $L_o$ do conversor SEPIC MCD.	55
Figura 47. Tensão Sobre o Interruptor do conversor SEPIC MCD.	56
Figura 48. Tensão sobre o Díodo do conversor SEPIC MCD.	56
Figura 49. Circuito do SEPIC em MCD com a topologia integrada simulado no ORCAD.	57
Figura 50. Geração dos Pulsos de comando do Inversor Halfbridge.	58
Figura 51. Sinal de Comando Inversor.	58

Figura 52. Tensão e Corrente de Entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	59
Figura 53. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	60
Figura 54. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	60
Figura 55. Corrente que percorre o indutor $L_o$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	61
Figura 56. Corrente que percorre o indutor $L_o$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	61
Figura 57. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	62
Figura 58. Corrente no Condensador $C_i$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	62
Figura 59. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	63
Figura 60. Tensão sobre o Indutor $L_i$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	64
Figura 61. Tensão sobre o Indutor $L_o$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	64
Figura 62. Tensão sobre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	65
Figura 63. Tensão sobre o díodo do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	65
Figura 64. LED's de Corrente alternada.	66

Figura 65. Tensão e Corrente de Entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	66
Figura 66. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	67
Figura 67. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	67
Figura 68. Corrente que percorre o indutor $L_o$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	68
Figura 69. Corrente que percorre o indutor $L_o$ em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	68
Figura 70. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	69
Figura 71. Corrente no Condensador $C_i$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	69
Figura 72. Tensão e Corrente de saída.	70
Figura 73. Tensão sobre o indutor $L_i$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	71
Figura 74. Tensão sobre o indutor $L_o$ do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	71
Figura 75. Tensão sobre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	72
Figura 76. Tensão sobre o díodo do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	72
Figura 77. Setup do conversor SEPIC em MCD.	74
Figura 78. Fator de Potência do conversor SEPIC em MCD.	74

Figura 79. Potência Ativa do conversor SEPIC em MCD.	75
Figura 80. Potência Aparente do conversor SEPIC em MCD.	75
Figura 81. Potência Reativa do conversor SEPIC em MCD.	76
Figura 82. Tensão e corrente de entrada do conversor SEPIC em MCD.	76
Figura 83. Tensão de entrada x tensão de saída do conversor SEPIC em MCD.	77
Figura 84. Corrente do indutor $L_i$ baixa frequência do conversor SEPIC em MCD.	77
Figura 85. Corrente do indutor $L_i$ alta frequência do conversor SEPIC em MCD.	78
Figura 86. Corrente indutor $L_o$ baixa frequência do conversor SEPIC em MCD.	78
Figura 87. Corrente no Interruptor do conversor SEPIC em MCD.	79
Figura 88. Tensão de saída x Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD.	79
Figura 89. Pulsos de comando interruptores do inversor <i>halfbridge</i> .	80
Figura 90. Fator de potência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	80
Figura 91. Potência Aparente do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	81
Figura 92. Potência Ativa do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	81
Figura 93. Potência Reativa do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	82
Figura 94. Tensão retificada de entrada e corrente de entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	82
Figura 95. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	83

Figura 96. Corrente que percorre o indutor $L_i$ em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	83
Figura 97. Corrente indutor $L_o$ em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	84
Figura 98. Corrente que percorre o indutor $L_o$ em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	84
Figura 99. Corrente que percorre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	85
Figura 100. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	85
Figura 101. Esquemático do conversor SEPIC em MCCr com a utilização do circuito integrado MC34262.	92
Figura 102. Protótipo do Conversor SEPIC MCCr.	93
Figura 103. Tensão de Entrada e pulsos de Comando do SEPIC MCCr.	95
Figura 104 Tensão de Saída e Pulsos PWM do SEPIC MCCr.	95
Figura 105. Tensão de Saída e Pulsos PWM do SEPIC MCCr.	96
Figura 106. Esquemático do circuito do retificador Boost MCCr.	97
Figura 107. Protótipo do retificador Boost MCCr.	98
Figura 108. Tensão e corrente de entrada do retificador Boost MCCr.	99
Figura 109. Pulsos de comando do retificador Boost MCCr.	100
Figura 110. Pulsos de comando do retificador Boost MCCr.	100
Figura 111. Tensão de saída do retificador Boost MCCr.	101



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1. Calendarização do projeto.	3
Tabela 2. Tabela para o coeficiente de multiplicação $F$ da Equação (12). Fonte: Manual para Correção do Fator de Potência [5].	12
Tabela 3. Especificações do conversor SEPIC em MCD	38
Tabela 4. Valores obtidos para o retificador SEPIC em MCD	42
Tabela 5. Valores Utilizados no Conversor SEPIC em MCD	43
Tabela 6. Valores de corrente dos principais componentes do conversor SEPIC em MCD	43
Tabela 7. Tabela dos Parâmetros do Indutor $L_i$	44
Tabela 8. Tabela dos Parâmetros do Indutor $L_o$	44
Tabela 9. Tabela de núcleos.	45
Tabela 10. Parâmetros do Condutor	45
Tabela 11. Valores Calculados das Equações: Equação (87), Equação (88), Equação (89), Equação (90) e Equação (91)	46
Tabela 12. Principais Parâmetros dos Indutores no Conversor SEPIC em MCD	46
Tabela 13. Semicondutores utilizados no protótipo.	48
Tabela 14. Condensadores utilizados no protótipo.	48
Tabela 15. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo SEPIC MCD.	54

Tabela 16. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.	63
Tabela 17. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.	70
Tabela 18. Comparação entre os valores teóricos e os valores obtidos em simulação do conversor SEPIC MCD.	88
Tabela 19. Comparação entre os valores teóricos do conversor SEPIC e a Simulação da Topologia integrada com carga RL.	88
Tabela 20. Comparação entre dos valores de corrente eficaz do indutor $L_i$ , indutor $L_o$ e do interruptor entre o conversor SEPIC e a Simulação da Topologia integrada com carga RL.	89
Tabela 21. Valores Utilizados no Conversor SEPIC em MCCr	93
Tabela 22. Lista de componentes utilizados no controlo do conversor SEPIC MCCr	94
Tabela 23. Lista de componentes utilizados para o retificador Boost MCCr.	99

## *Acrónimos*

A	–	Ampere
AC	–	Alternating Current
AWG	–	American Wire Gauge
B	–	Fluxo de Indução máximo
BCM	–	Boundary Conduction Mode
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Continua
$C_i$	–	Condensador de Entrada
$C_{imax}$	–	Valor Máximo de Capacitância de Entrada
$C_{imim}$	–	Valor Mínima de Capacitância de Entrada
$C_o$	–	Condensador de Saída
$C_{o1}$	–	Condensador de Saída 1
$C_{o2}$	–	Condensador de Saída 2
$C_{omax}$	–	Valor Máximo de Capacitância de Saída
$C_{imim}$	–	Valor Mínimo de Capacitância de Saída
D	–	Razão Cíclica
DCM	–	Discontinuous Conduction Mode
$D_{max}$	–	Razão Cíclica Máxima

$D_{\text{mim}}$	– Razão Cíclica Mínima
$E$	– Tensão Barramento CC
$FP$	– Fator de Potência
$f_r$	– Frequência da Rede
$f_s$	– Frequência de Comutação
$G_{e\text{mcc}}$	– Ganho Estático Modo de Condução Contínua
$G_{e\text{mcd}}$	– Ganho Estático Modo de Condução Descontínua
$H$	– Potência Harmônica
$ID_{\text{ef}}$	– Corrente Eficaz Diodo
$ID_{\text{med}}$	– Corrente media Diodo
$I_{\text{ef}}$	– Corrente Eficaz Indutor
$I_G$	– Tamanho Entreferro
$I_{\text{in\_pico\_max}}$	– Valor máxima de pico corrente de Entrada
$I_{\text{in\_pico\_mim}}$	– Valor mínima de pico corrente de Entrada
$IL_i$	– Corrente Indutor de Entrada
$IL_{\text{ief}}$	– Corrente Eficaz do Indutor de Entrada
$IL_{\text{imax}}$	– Corrente Máxima Indutor de Entrada
$IL_{\text{imed}}$	– Corrente Média Indutor de Entrada
$IL_{\text{imim}}$	– Corrente Mínima Indutor de Entrada
$IL_o$	– Corrente Indutor de Saída

$I_{L_{oef}}$	– Corrente Eficaz do Indutor de Saída
$I_{L_{omax}}$	– Corrente Máxima Indutor de Saída
$I_{L_{omed}}$	– Corrente Média Indutor de Saída
$I_{L_{omim}}$	– Corrente Mínima Indutor de Saída
$I_o$	– Corrente que percorre a carga
$I_{o\_barramenteo\_max}$	– Corrente máxima barramento CC
$I_{o\_barramenteo\_max\_critico}$	– Corrente Crítica Máxima Barramento CC
$I_{o\_barramenteo\_mim}$	– Corrente mínima barramento CC
$I_{o\_barramenteo\_mim\_critico}$	– Corrente Crítica Mínima Barramento CC
$I_p$	– Corrente de Pico
$I_{S_{ef}}$	– Corrente Eficaz Interruptor
$I_{S_{med}}$	– Corrente media Interruptor
$J$	– Densidade Máxima de Corrente
$K_w$	– Fator de utilização da área do núcleo
$L$	– Indutor
$LED$	– Light Emmissor Led
$LFSQW$	– Low Frequency Square Wave
$L_i$	– Indutor de Entrada
$L_{imax}$	– Valor Máximo do Indutor de Entrada
$L_{imim}$	– Valor Mínimo do Indutor de Entrada

$L_o$	– Indutor de Saída
$L_{omax}$	– Valor Máximo do Indutor de Saída
$L_{omim}$	– Valor Mínimo do Indutor de Saída
MCC	– Modo de Condução Continua
MCCr	Modo de Condução Crítica
MCD	– Modo de Condução Descontinua
$\eta$	– Rendimento
$N_{fios}$	– Número de Fios
P	– Potência Ativa
PER	– Período
$P_o$	– Potência de Saída
PW	– Pulse Wave
PWM	– Pulse Width Modulation
Q	– Potência Reativa
$q_{max}$	– Ganho Estático Máximo
$q_{mim}$	– Ganho Estático Mínimo
R	– Resistência
RGB	– Red Green Blue
$R_o$	– Carga
S	– Potência Aparente

SEPIC	– Single Ended Primary Inductor Converter
T	– Período
TF	– Time Fall
$t_{on}$	– Período Acionado
$t_{off}$	– Período Bloqueado
TR	– Time Rise
$T_s$	– Período de Comutação
V	– Volt
VA	– Volt-Ampere
VAR	– Volt-Ampere Reativo
$VC_i$	– Tensão Sobre os Interruptores do Condensador de Entrada
$VC_o$	– Tensão Sobre os Interruptores do Condensador de Saída
VD	– Tensão Sobre os Interruptores do Diodo
$V_G$	– Valor de pico da senóide de entrada
$V_{inmax}$	– Valor Máximo de tensão de Entrada
$V_{inmin}$	– Valor Mínimo de tensão de Entrada
$V_{inpicomax}$	– Valor pico de $V_{inmax}$
$V_{inpicomin}$	– Valor pico de $V_{inmin}$
$VL_i$	– Tensão Sobre os Interruptores do Indutor de Entrada
$VL_o$	– Tensão Sobre os Interruptores do Indutor de Saída

$V_o$	– Tensão de Saída
$V_{omed}$	– Valor médio da tensão de saída
$V_S$	– Tensão Sobre os Interruptores do Interruptor
$W$	– Watt
$\Delta I_{L1}$	– Ondulação máxima de Corrente Indutor L1
$\Delta I_{L1mac}$	– Variação Média de Corrente para a Entrada de Maior Tensão
$\Delta I_{Limim}$	– Variação Média de Corrente para a Entrada de Menor Tensão
$\Delta t_1$	– Primeiro Período de Condução
$\Delta t_2$	– Segundo Período de Condução
$\Delta t_3$	– Terceiro Período de Condução
$\Delta V_{Ci\_med\_max}$	– Variação Média para a Entrada de Maior Tensão
$\Delta V_{Ci\_med\_mim}$	– Variação Média para a Entrada de Maior Tensão
$\Delta V_o$	– Ondulação de Corrente
$\lambda$	– Ângulo Entre Fundamental e Corrente total
$\Phi$	– Ângulo Entre Potência Ativa e Reativa
$\Omega$	– Frequência Angular

# 1. INTRODUÇÃO

Este documento tem como o objetivo de apresentar um sistema de potência eletrônica com correção do fator de potência (PFC) para alimentar lâmpadas de LED CA. O conversor escolhido é responsável pela correção do fator de potência e a regulação do barramento CC. Neste trabalho optou-se por utilizar o conversor SEPIC em MCD devido à experiência anterior do autor. A alimentação por corrente alterada é feita por um inversor Half-Bridge onde os mosfets são comandados por uma modulação com pulsos assimétricos, como a modulação I-LFSQW.

Neste trabalho, serão apresentados os conceitos teóricos, simulações e resultados experimentais.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A utilização de sistemas de iluminação LED tornou-se uma opção muito comum para a reposição das lâmpadas convencionais como incandescente, fluorescente ou HPS. Os LEDs são utilizados em semáforos, iluminação interna, iluminação de ambientes arquitetônicos e ecrãs. Porém, a aplicação em lâmpadas LEDs cresceu significativamente nos últimos anos.[1][2]. Mais recentemente surgiram o uso de lâmpadas LEDs de corrente

alternada para aplicações de sistemas para a iluminação [3][4]. Em relação aos LEDs CC, os LEDs CA possuem a vantagem de produzir uma maior potência consumindo uma menor corrente. Assim é possível utilizar LEDs associados em paralelo para aumentar o fluxo luminoso do sistema. Devido à elevada tensão de ruptura dos LEDs, eles podem ser conectados a uma fonte através de uma resistência ou uma capacitância. Entretanto possui uma vida útil média de 50000 horas [4], contra 100000 horas de um LED CC.

Ocorrem dois problemas quando é utilizado uma resistência para limitar a corrente nos LED CA: as perdas na resistência e a alta distorção harmônica na corrente de entrada devida a alta tensão de ruptura. A

Figura 1 é a representação da ligação de LEDs CA diretamente com uma fonte. Pode ser observado a alta distorção harmônica na corrente de entrada.

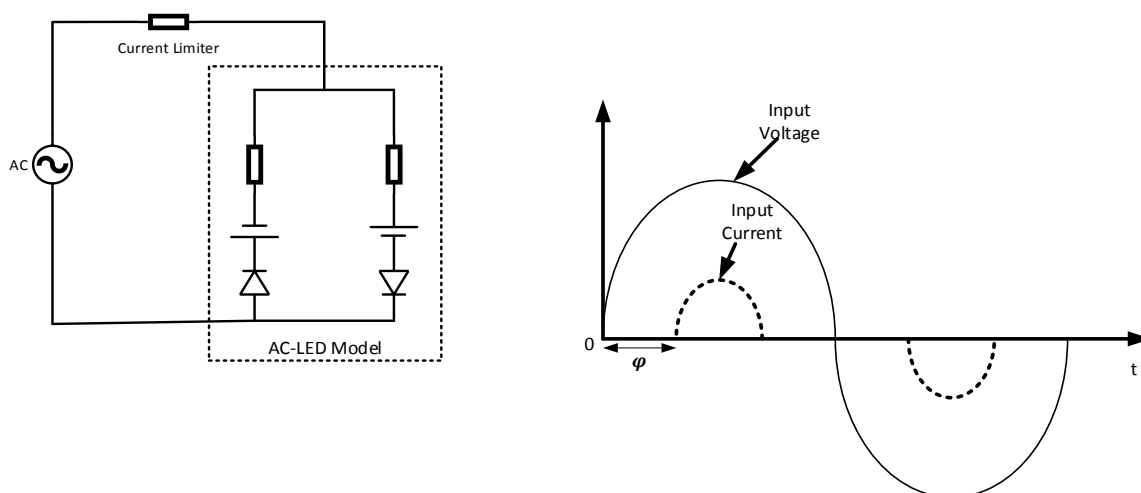


Figura 1. Circuito de um LED CA com uma resistência limitadora e as suas formas de onda de tensão e corrente de entrada.

## 1.2. OBJETIVOS

O uso de um regulador linear seria uma solução para gerar uma tensão CC seguido de um inversor, no entanto, devido o fato dos LEDs CA produzirem uma alta distorção harmônica devido à sua alta tensão de ruptura, é utilizado um conversor estático de energia elétrica para aumentar a eficiência do sistema e efetuar a correção do fator de potência.

### 1.3. CALENDARIZAÇÃO

A calendarização, apresentada na Tabela 1, consiste no tempo utilizado para cada atividade, tempo necessário para o estudo teórico do assunto, projeto, simulação, montagem da placa de circuito impresso, testes e a escrita do relatório.

### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O capítulo 2 é o estudo dos conceitos teóricos básicos para o entendimento do tema, o capítulo 3 é o projeto do conversor e o projeto físico dos indutores, capítulo 4 simulação do conversor SEPIC e da topologia integrada com carga RL e a simulação das cargas de LEDs CA, capítulo 5 testes do conversor SEPIC MCD e da topologia integrada com carga RL, capítulo 6 comparação dos resultados de teóricos com os resultados de simulação e práticos, capítulo 7 projeto e resultados experimentais do conversor SEPIC MCCR, capítulo 8 resultados experimentais do retificador Boost MCCR, e por último, as conclusões no capítulo 9.

**Tabela 1. Calendarização do projeto.**

ID	Nome das etapas	Início	Fim	Duração	mar 2017				abr 2017				maí 2017				jun 2017			jul 2017			ago 2017				set 2017				out 2017			
					5/3	12/3	19/3	26/3	2/4	9/4	16/4	23/4	30/4	7/5	14/5	21/5	28/5	4/6	11/6	18/6	25/6	2/7	9/7	16/7	23/7	30/7	6/8	13/8	20/8	27/8	3/9	10/9	17/9	24/9
1	Estudo dos conceitos teóricos	01/03/2017	04/04/2017	5sem	[Barra azul]																													
2	Projeto do Conversor SEPIC	03/04/2017	14/04/2017	2sem	[Barra azul]																													
3	Simulação do Conversor SEPIC	04/04/2017	14/04/2017	1sem 12h	[Barra azul]																													
4	Simulação da Topologia	17/04/2017	05/05/2017	3sem	[Barra azul]																													
5	Projeto físico dos indutores	05/05/2017	11/05/2017	1sem	[Barra azul]																													
6	Montagem dos Indutores	15/05/2017	19/05/2017	1sem	[Barra verde]																													
7	PCB	17/05/2017	13/06/2017	4sem	[Barra vermelha]																													
8	Testes	12/06/2017	15/09/2017	14seman	[Barra verde]																													
9	Elaboração do Relatório Final	03/04/2017	20/10/2017	29sem	[Barra verde]																													



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como o objetivo a apresentação, de forma breve, dos principais elementos necessários a execução de tal projeto.

Primeiramente será descrito o que é o fator de potência e por qual motivo ele deve ser considerado para tal projeto. Posteriormente será apresentado o conversor SEPIC nos seus modos de condução, formas de ondas, equacionamento e, por fim, o inversor Halfbridge onde será apresentado as suas formas de onda e equacionamento.

### **2.1. FATOR DE POTÊNCIA E TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA**

#### **2.1.1 Fator de Potência Carga Linear**

O Fator de Potência está relacionado com o quão eficiente uma carga consegue transformar a energia que é alimentada em trabalho. Para entender o conceito de fator de potência, vamos começar com um exemplo: para que um motor funcione é necessário alimentar um campo eletromagnético, que sua vez movimentará o eixo do motor, desta forma o motor consome dois tipos de potência [5]:

- Potência Ativa (P): Potência que realiza trabalho gerando: movimento, calor, luz, calor, som entre outros. Sua unidade é Watt (W);

- Potência Reativa (Q): Potência consumida para gerar campos eletromagnéticos, é necessário em motores, transformadores, fornos de indução, etc. Sua unidade é VAR (Volt-ampere reativo).

Para tensões puramente senoidais, a relação de potência ativa com a potência reativa é conhecida como fator de potência. A potência total consumida pela carga é chamada de Potência Aparente (S), a sua unidade de medida é VA (Volt-ampere). Uma forma muito comum de se representar as relações entre as potências é o triângulo retângulo de potências representado na Figura 2.

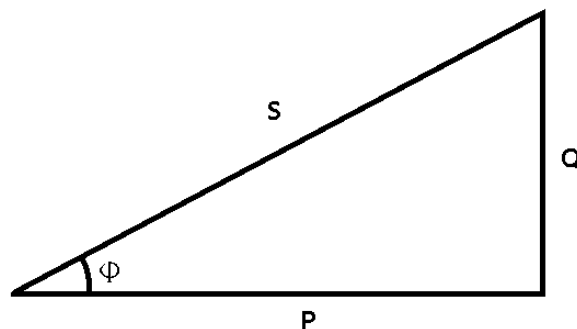


Figura 2. Triângulo Retângulo da Potência.

Para sistemas com formas de onda senoidais, a partir do triângulo retângulo de potências podemos calcular o valor do Fator de Potência (FP), pela Equação (1), o módulo da Potência Aparente (S) é calculada através da Equação (2).

$$FP = \frac{W}{VA} = \cos \varphi = \cos\left(\arctg \frac{P}{Q}\right) \quad (1)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

O valor máximo do Fator de Potência é unitário, isto significa que toda a energia consumida pela carga é transformada em trabalho, a Potência Aparente e a Potência Reativa possuem o mesmo módulo.

### 2.1.2 Fator de Potência Carga não Lineares

Uma carga não linear, é uma carga que consiste de elementos comutados como: mosfet, transístores díodos entre outros [6]. Para uma carga não linear alimentada por um sistema monofásico senoidal, a tensão e corrente são representadas pela Equação (3) e Equação (4), respetivamente.

$$V_{SA} = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$i_{SA} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (4)$$

A potência instantânea é dada pela Equação (5).

$$p_a = V_{SA} \cdot i_{SA} = V[I_1 2 \sin \omega t (\sin \omega t - \phi_1)] + V \sum_{n=2}^{\infty} [I_n 2 \sin \omega t \sin(n\omega t - \phi_n)] \quad (5)$$

É possível substituir  $2 \sin A \sin B = \cos(A - B) - \cos(A + B)$ , obtendo a Equação (6).

$$p_a = V \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 (1 - \cos 2\omega t) - V \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1 \cdot \sin 2n\omega t + V \sum_{n=2}^{\infty} [\cos \phi_n (1 - \cos 2n\omega t) - \sin \phi_n \cdot \sin 2n\omega t] \quad (6)$$

A Potência Aparente, é dada pela Equação (7)

$$S = V \cdot I$$

$$S = V \cdot \sqrt{[I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots]} \quad (7)$$

Elevando os termos ao quadrado da Equação (7) e os ordenando é possível encontrar a relação que a potência aparente ao quadrado é igual a soma dos quadrados das potências ativa(P), reativa(Q) e harmônica(H), descrita na Equação (8)

$$S^2 = V^2 \cdot I_1^2 + V^2 [I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots]$$

$$S^2 = (V \cdot I_1 \cos \phi_1)^2 + (V \cdot I_1 \sin \phi_1)^2 + V^2 [I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots]$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (8)$$

A potência harmônicas, podem ser calculados em VA segundo a Equação (9)

$$H = V \sqrt{[I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots]} \quad (9)$$

A representação gráfica das potências, é dada pelo tetraedro das potências, representado na Figura 3.

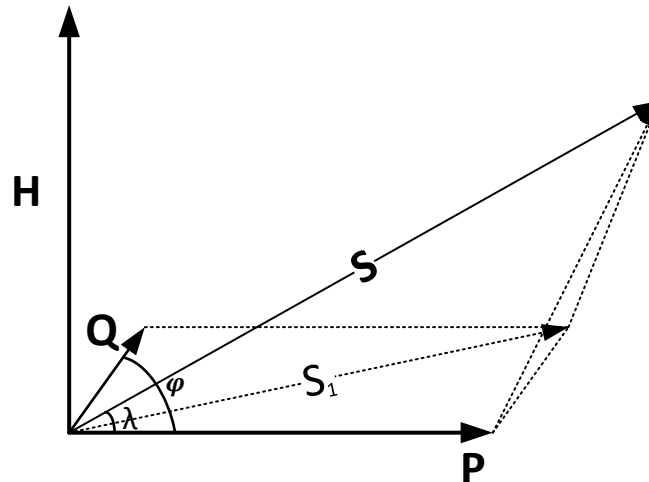


Figura 3. Tetraedro das potências.

A Equação (10) mostra o cálculo do fator de potência, o  $\cos \lambda$  é a relação entre a fundamental da corrente com a corrente total, é possível observar que o fator de potência diminui conforme a presença das harmônicas [6].

(10)

$$PF = \frac{P}{S}$$

$$PF = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{V \cdot I}$$

$$PF = \left( \frac{I_1}{I} \right) \cos \phi_1$$

$$PF = \cos \lambda \cdot \cos \phi_1 \quad (11)$$

### 2.1.3 Consequências

Quanto menor o valor do fator de potência maior é o valor da Potência Aparente, podendo ocasionar [5][6]:

- Maiores Perdas por Condução: para uma dada corrente na carga, a corrente que percorre o condutor na fonte tende a ser maior, ocasionando um maior aquecimento do condutor;
- Maior queda de tensão: O aumento da corrente gera uma maior queda de tensão devido a resistência elétrica dos materiais;

- Subutilização da Capacidade Instalada: com o aumento do consumo devido ao baixo fator de potência mais cargas poderiam ser alimentadas com a mesma energia que está a ser desperdiçada;
- Desfasamento da corrente com a tensão;
- Custos às empresas, devido ao baixo fator de potência.

A taxa de distorção harmônica está relacionada com cargas não lineares conectadas à rede. Quando existem correntes harmônicas a circular pela rede, estas causam tensões harmônicas através das impedâncias de rede, assim, ocorre a deformação da forma de tensão.

Uma carga não linear é quando a forma de onda de corrente que ela não absorve é diferente da forma de onda de tensão. A seguir encontram-se alguns exemplos de cargas não lineares [5][6]:

- Fontes chaveadas para alimentar dispositivos como: fontes de computadores, telemóveis, televisores;
- Fornos de micro-ondas;
- Máquinas de soldadura;
- Motores assíncronos ou motores de corrente contínua.

Consequências da Taxa de Distorção Harmônica

- Sobrecarga de rede, causando um maior gasto com eletricidade;
- Vibrações em transformadores, motores causando transformação e envelhecimento precoce;
- Em fábricas podem causar perturbação em redes comunicação.

## **2.2. MÉTODOS PARA A CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA**

Nesta secção serão descritas brevemente alguns métodos utilizados para a correção do fator de potência.

### 2.2.1 Solução Passiva

A solução passiva consiste em aplicar elementos reativos no circuito para alcançar o fator de potência unitário [5][8].

As principais vantagens da solução passiva para a correção do fator de potência são:

- São sistemas robustos;
- Alta confiabilidade;
- Insensibilidade aos surtos de rede;
- Operação silenciosa.

As principais desvantagens da solução passivas para a correção do fator de potência são:

- Seu peso e volume são elevados;
- Seu dimensionamento não é simples;
- Não é possível fazer a regulação de tensão;
- Se for alterado o fator de potência da carga, o projeto se torna ineficiente.

Uma solução passiva é utilizar um filtro LC na saída do retificador para fornecer uma tensão de saída constante e filtrar os harmônicos, uma vez que a corrente absorvida da rede é quase quadrada, quando é operado em modo de condução descontínua. O FP máximo de um filtro LC é de 0,763. Este valor do fator potência pode ser elevado para 0,865 com a utilização de um condensador de entrada  $C_{in}$ , como ilustrado na Figura 4 [7].

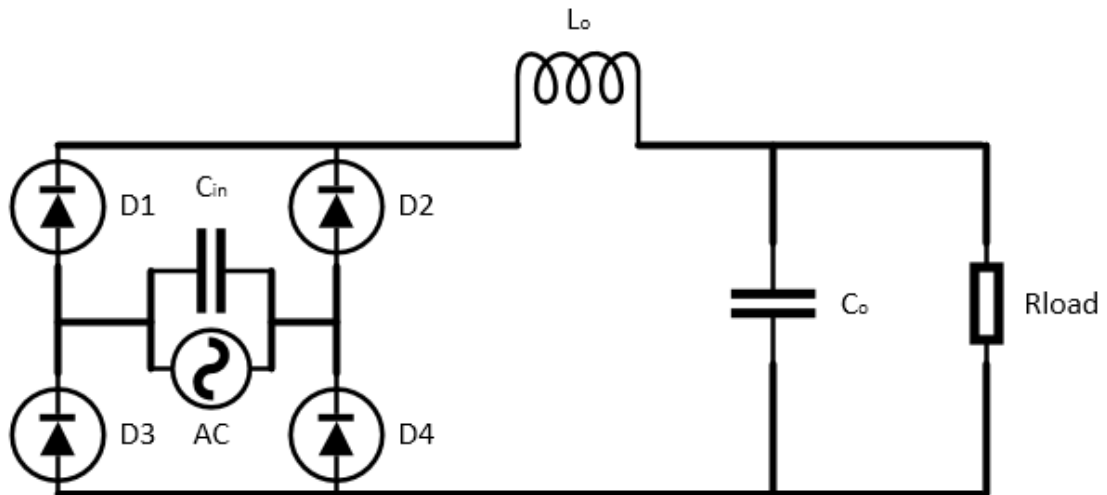


Figura 4. Topologia “otimizada” para um retificador de fase única.

Outra solução passiva para a correção do fator de potência é a utilização de condensadores quando a carga é um motor elétrico [5]. A Figura 5 é a representação de como é feita a ligação do banco capacitivo para a correção do fator de potência de um motor.

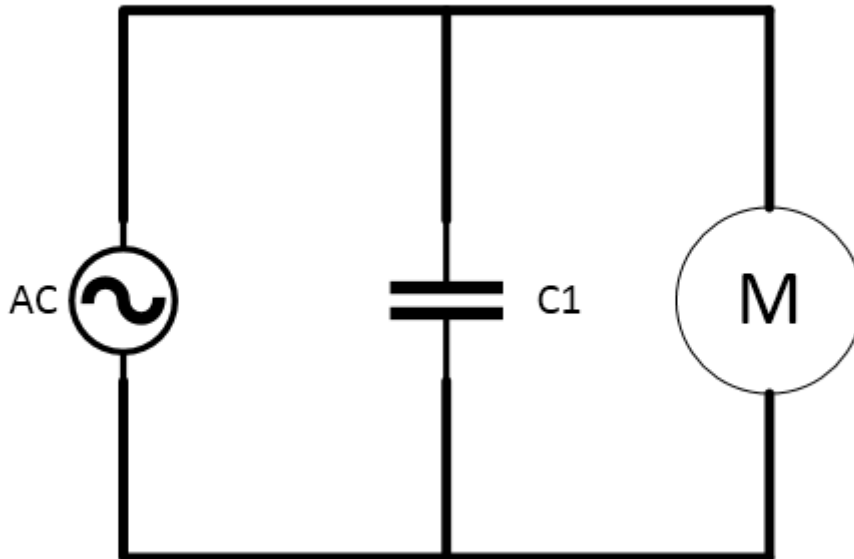


Figura 5. Uso de condensador para aumento do fator de potência.

O primeiro passo para calcular a capacidade do condensador é estimar o valor da potência reativa, dada pela Equação (12).

$$P_{ot} R_{reativa} (k \text{ var}) = \frac{\%c \text{ arg } a \cdot P \cdot F}{\eta} \quad (12)$$

Onde: %carga é o percentual de carga a ser utilizado,  $\eta$  é o rendimento do motor,  $P$  é a potência ativa e  $F$  é um coeficiente de multiplicação que está disponível na Tabela 2.

**Tabela 2. Tabela para o coeficiente de multiplicação F da Equação (12).**

**Fonte: Manual para Correção do Fator de Potência [5].**

FP Atual	Fator de Potência Desejado																				
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.50	0.982	1.008	1.034	1.060	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.306	1.337	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.589	1.732
0.51	0.937	0.962	0.989	1.015	1.041	1.067	1.094	1.120	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.687
0.52	0.893	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.050	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.248	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	0.850	0.876	0.902	0.928	0.954	0.980	1.007	1.033	1.060	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600
0.54	0.809	0.835	0.861	0.887	0.913	0.939	0.966	0.992	1.019	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.196	1.230	1.267	1.308	1.356	1.416	1.559
0.55	0.769	0.795	0.821	0.847	0.873	0.899	0.926	0.952	0.979	1.007	1.035	1.063	1.093	1.124	1.156	1.190	1.227	1.268	1.316	1.376	1.519
0.56	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151	1.188	1.229	1.277	1.337	1.480
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986	1.016	1.047	1.079	1.113	1.150	1.191	1.239	1.299	1.442
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.076	1.113	1.154	1.202	1.262	1.405
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.776	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040	1.077	1.118	1.166	1.226	1.369
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004	1.041	1.082	1.130	1.190	1.333
0.61	0.549	0.575	0.601	0.624	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.156	1.299
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.726	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937	0.974	1.015	1.063	1.123	1.266
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.720	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.474	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.068	1.201
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.918	0.966	1.026	1.169
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.935	0.995	1.138
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.965	1.108
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.786	0.827	0.875	0.935	1.049
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.906	1.049
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.604	0.652	0.712	0.855
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.685	0.829
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.209	0.235	0.262	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473	0.510	0.551	0.599	0.659	0.802
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.633	0.776
0.80		0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.609	0.750
0.81			0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82				0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698
0.83					0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.529	0.672
0.84						0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85							0.027	0.053	0.080	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86								0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.342	0.390	0.450	0.593
0.87									0.027	0.055	0.083	0.111	0.141	0.173	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88										0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89											0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.220	0.261	0.309	0.369	0.512
0.90												0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.233	0.281	0.341	0.484
0.91													0.030	0.061	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92														0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426
0.93															0.032	0.066	0.103	0.144	0.192	0.252	0.395
0.94																0.034	0.071	0.112	0.160	0.221	0.363
0.95																	0.037	0.079	0.126	0.186	0.329
0.96																		0.041	0.089	0.149	0.292
0.97																			0.048	0.108	0.251
0.98																				0.060	0.203
0.99																					0.143

A capacitância (em  $\mu\text{F}$ ) é dada pela Equação (13).

$$C = \frac{P_{ot} R_{reativa} (k \text{ var})}{(V_{FF} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-9})} \quad (13)$$

Onde:

- $V_{FF}$ : Tensão entre fases;
- $f$ : é a frequência da rede.

### 2.2.2 Solução Ativa

A correção ativa utiliza um ou mais interruptores em conjuntos com elementos passivos para a correção do fator de potência. Algumas vantagens da solução ativa frente à solução passiva são [8]:

- Menor peso e volume;
- Se o fator da carga mudar, o circuito não precisará ser redimensionado.

O uso da correção ativa utiliza conversores (pré -reguladores), das mais diversas topologias como, por exemplo: SEPIC, CUK, ZETA, FLYBACK e BOOST, para a correção do fator de potência. Estes conversores operados em MCD, podem ser utilizados para a correção do fator de potência, através de um PWM a uma frequência constante. Simplificando, nestes sistemas a corrente pedida à rede é, em média, proporcional à senoide da tensão da rede tornando o FP praticamente unitário [9].

## 2.3. RETIFICADOR SEPIC MCD

O conversor SEPIC é uma topologia de um conversor estático de energia elétrica proposto por Massey em 1977, o qual possui as seguintes características [10]:

- Possibilidade de operar quer como um elevador quer como um abaixador de tensão;
- A entrada possui como característica uma fonte de tensão;
- A saída se comporta como uma fonte de corrente;
- Possibilidade de isolar galvanicamente utilizando indutores acoplados
- Possui um único interruptor.
- Para tensões de entradas muito elevadas, a execução do conversor SEPIC pode ser inviável devido ao alto estresse que o interruptor é submetido;

- Dificuldade em controlar o conversor, por ser caracterizado como um sistema de 4ª ordem;

O conversor SEPIC é uma das principais topologias utilizadas como drivers para lâmpadas LED devido ao fato de poder operar nos três modos de condução, alto fator de potência e sua saída pode ter uma tensão maior ou menor que a tensão de entrada [11][12][13].

A Figura 6 ilustra a topologia do conversor estático de energia elétrica SEPIC e os sentidos das correntes e as polaridades de tensões.

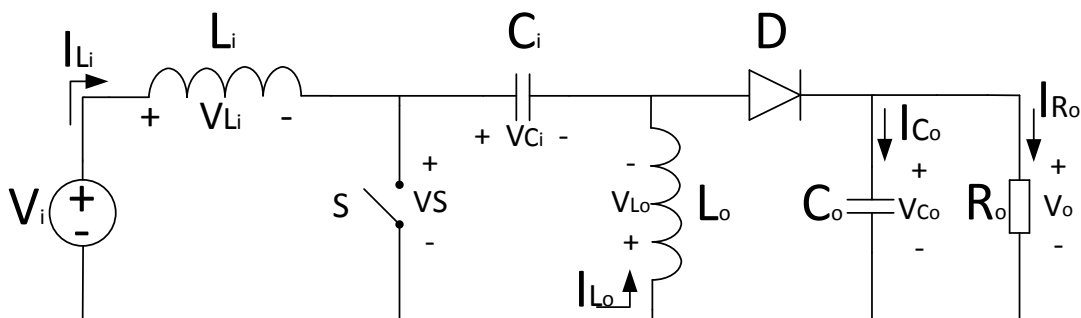


Figura 6. Representação do conversor SEPIC e a convenção dos sentidos das correntes e as polaridades de tensões.

### 2.3.1. OPERAÇÃO EM MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUO

As equações e formas de ondas foram baseadas em [14].

O modo de condução contínuo (MCC) no conversor SEPIC apresenta apenas duas etapas de operação.

- Primeira Etapa

A Figura 7 é a representação da primeira etapa de condução. O interruptor S está acionado e o diodo D está bloqueado. A carga  $R_o$  é alimentada pelo condensador  $C_o$ .

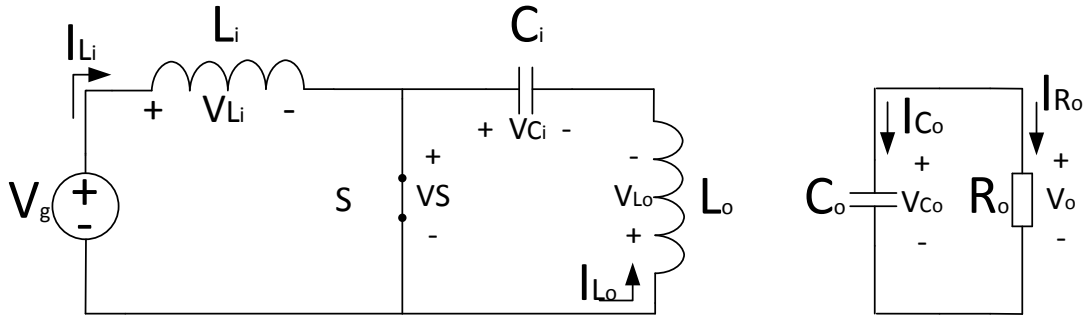


Figura 7. Primeira Etapa de Operação no MCC.

As correntes dos Indutores  $L_i$  e  $L_o$  crescem linearmente respetivamente pelas Equação (14) e Equação (15).

$$IL_i(t) = \frac{V_g}{L_i} t + IL_{i\min} \quad (14)$$

$$IL_o(t) = \frac{V_g}{L_o} t + IL_{o\min} \quad (15)$$

- Segunda Etapa de Operação

A segunda etapa de condução, representada na Figura 8, o interruptor S é bloqueado. O díodo D entra em condução. A energia armazenada nos indutores  $L_o$  e  $L_i$  é transferida para o condensador  $C_o$ .

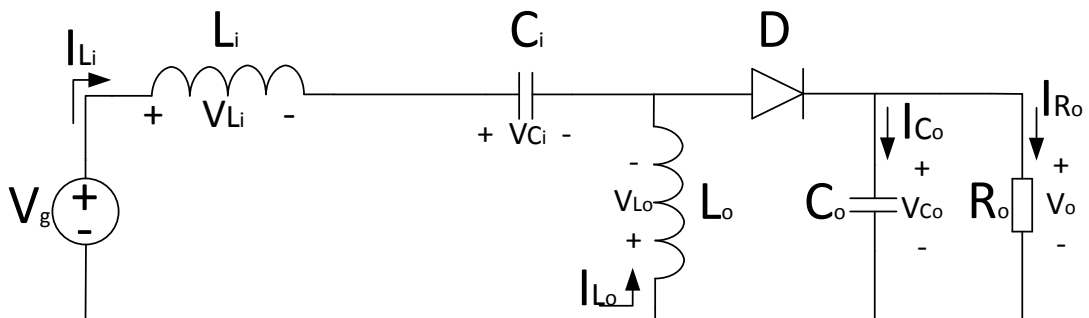


Figura 8. Segunda Etapa de Operação no MCC.

As correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  decrescem linearmente respetivamente pela Equação (16) e Equação (17).

$$IL_i(t) = -\frac{V_g}{L_i} t + IL_{o\max} \quad (16)$$

$$iL_o(t) = -\frac{V_o}{L_o}t + iL_{o\max} \quad (17)$$

- Formas de Onda

A Figura 9 é a representação das formas de onda de tensão sobre os indutores, interruptor e diodo.

O primeiro intervalo de tempo  $\Delta t_1$  é definido pela Equação (18).

$$\Delta t_1 = D \cdot T_s \quad (18)$$

O período de comutação é dado pela Equação (19), onde a  $f_s$  é a frequência de comutação.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (19)$$

O segundo intervalo de tempo  $\Delta t_2$ , é o período complementar, como é dado na Equação (20).

$$\Delta t_2 = (1-D) \cdot T_s \quad (20)$$

A Figura 9 é a representação das formas de onda de tensão dos indutores  $L_I$  e  $L_O$ , do interruptor e do diodo do conversor SEPIC no MCC.

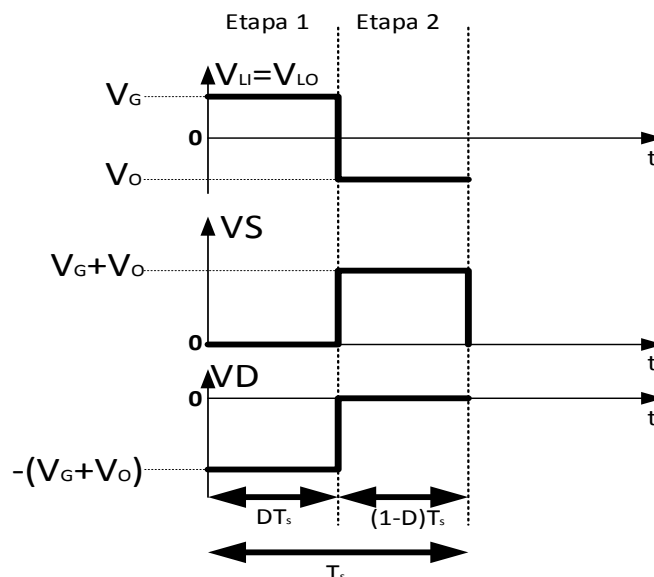


Figura 9. Principais Formas de Onda de Tensão do Conversor SEPIC em Modo de Condução Contínua.

As formas de ondas de correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$ , do interruptor, do díodo e dos condensadores  $C_i$  e  $C_o$ , do conversor SEPIC em MCC estão representadas na Figura 10.

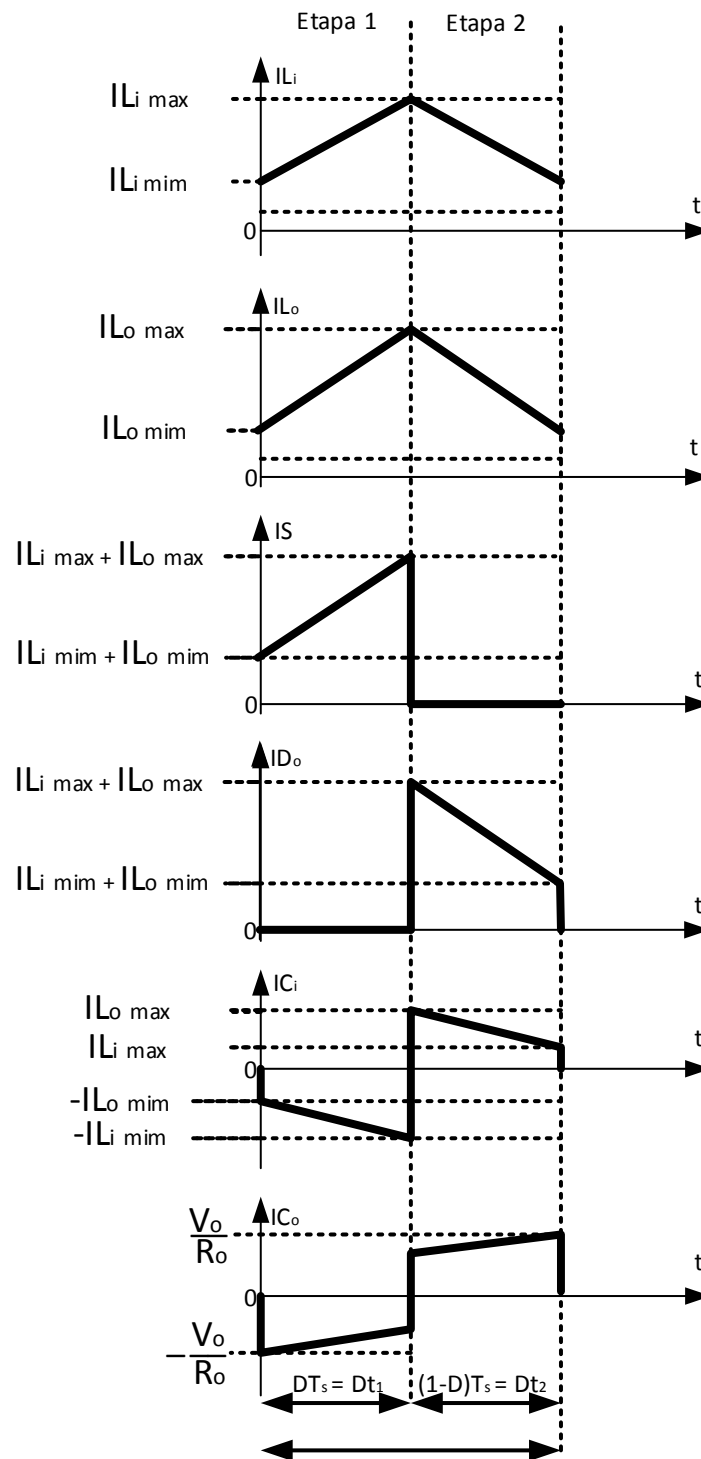


Figura 10. Principais Formas de Onda de Corrente do Conversor SEPIC no MCC.

- Indutores  $L_i$  e  $L_o$

A partir da primeira etapa de condução é possível obter os valores dos indutores  $L_i$  e  $L_o$ , através da Equação (21) e Equação (22).  $V_g$  é a tensão média de entrada,  $\Delta IL_i$  e  $\Delta IL_o$ , são a ondulação de corrente dos indutores  $L_i$  e  $L_o$ .

$$L_i = \frac{V_g \cdot D}{\Delta IL_i \cdot f_s} \quad (21)$$

$$L_o = \frac{V_o \cdot D}{\Delta IL_o \cdot f_s} \quad (22)$$

- Condensadores  $C_i$  e  $C_o$

O condensador  $C_o$  é representado pela Equação (23) e o condensador  $C_i$  é representado pela Equação (24), onde  $V_o$  é a tensão de saída e  $\Delta VC_i$  e  $\Delta VC_o$ , são a ondulação de tensão dos indutores  $L_i$  e  $L_o$ .

$$C_o = \frac{V_o \cdot D}{R_o \cdot \Delta VC_o \cdot f_s} \quad (23)$$

$$C_i = \frac{V_o \cdot D}{R_o \cdot \Delta VC_i \cdot f_s} \quad (24)$$

- Equações das principais correntes do conversor SEPIC em MCC

As correntes mínima ( $IL_{imim}$ ) e máxima ( $IL_{imax}$ ) do indutor  $L_i$  são representadas na Equação (25) e Equação (26), respetivamente.

$$IL_{imim} = \frac{D}{1-D} \left( \frac{-V_g \cdot R_o + V_g \cdot R_o \cdot D + 2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot f_s}{2 \cdot R_o \cdot L_i \cdot f_s} \right) \quad (25)$$

$$IL_{imax} = \frac{D}{1-D} \left( \frac{V_g \cdot R_o - V_g \cdot R_o \cdot D + 2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot f_s}{2 \cdot R_o \cdot L_i \cdot f_s} \right) \quad (26)$$

As correntes mínima ( $IL_{omim}$ ) e máxima ( $IL_{omax}$ ) do indutor  $L_o$  são representadas na Equação (27) e Equação (28), respetivamente.

$$IL_{omim} = \left( \frac{2 \cdot V_o \cdot L_o \cdot f_s - V_g \cdot R_o \cdot D}{2 \cdot R_o \cdot L_i \cdot f_s} \right) \quad (27)$$

$$IL_{omax} = \left( \frac{2 \cdot V_o \cdot L_o \cdot f_s + V_g \cdot R_o \cdot D}{2 \cdot R_o \cdot L_i \cdot f_s} \right) \quad (28)$$

A corrente média ( $IL_{imed}$ ) e eficaz ( $IL_{ief}$ ) do indutor  $L_i$  são representadas na Equação (29) e Equação (30), respetivamente.

$$I_{L_{imed}} = \frac{D}{(1-D)} \cdot \frac{V_o}{R_o} \quad (29)$$

$$I_{L_{ief}} = \sqrt{\frac{D^2 [V_g^2 \cdot R_o^2 \cdot (D-1)^2 + 12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot f_s^2]}{12 \cdot L_i^2 \cdot R_o^2 \cdot f_s^2 (D-1)^2}} \quad (30)$$

A corrente eficaz ( $I_{L_{oef}}$ ) do indutor  $L_o$  é representada na Equação (31).

$$I_{L_{oef}} = \sqrt{\frac{V_g^2 \cdot R_o^2 \cdot D^2 + 12 \cdot V_o^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2}{12 \cdot L_o^2 \cdot R_o^2 \cdot f_s^2}} \quad (31)$$

A corrente eficaz no interruptor ( $I_{S_{ef}}$ ) é representada pela Equação (32).

$$I_{S_{ef}} = \sqrt{\frac{D[V_g^2 \cdot R_o^2 \cdot (L_i + L_o)^2 \cdot (D^4 - 2 \cdot D^3 + D^2) + 12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2]}{12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2 (D-1)^2}} \quad (32)$$

A corrente média do díodo ( $ID_{omed}$ ) e a corrente eficaz no díodo ( $ID_{ef}$ ) é representada pela Equação (33) e Equação (34), respetivamente.

$$ID_{omed} = \frac{V_o}{R_o} \quad (33)$$

$$ID_{ef} = \sqrt{\frac{V_g^2 \cdot R_o^2 \cdot D^2 \cdot (L_i + L_o)^2 \cdot (D^2 - 2 \cdot D + 1) + 12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2}{12 \cdot R_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s^2 (D-1)}} \quad (34)$$

O ganho estático do conversor SEPIC em MCC é representado pela Equação (35).

$$Ge_{MCC} = \frac{D}{(1-D)} \quad (35)$$

### 2.3.2. OPERAÇÃO EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO

O modo de condução descontínuo (MCD) do conversor SEPIC apresenta três etapas de operação.

- Primeira Etapa

A primeira etapa no MCD é similar à primeira etapa de operação no MCC, já apresentada neste trabalho.

- Segunda Etapa

A segunda etapa no MCD é similar à segunda etapa no MCC, já apresentada neste trabalho.

- Terceira Etapa

A terceira etapa de operação no MCD, representada na Figura 11, é a etapa que caracteriza a descontinuidade, as correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  se mantêm constante.

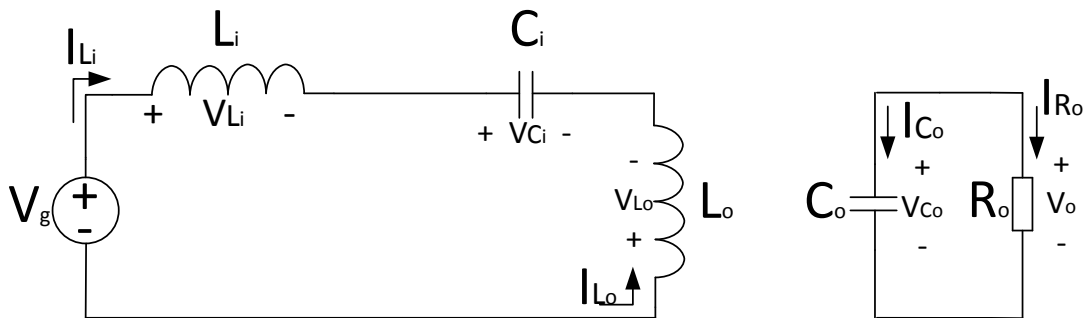


Figura 11. Terceira Etapa de Condução no MCD.

A Figura 12 é a representação das formas de onda de tensão do indutor de entrada  $L_i$ ,  $L_o$ , do interruptor S e do diodo.

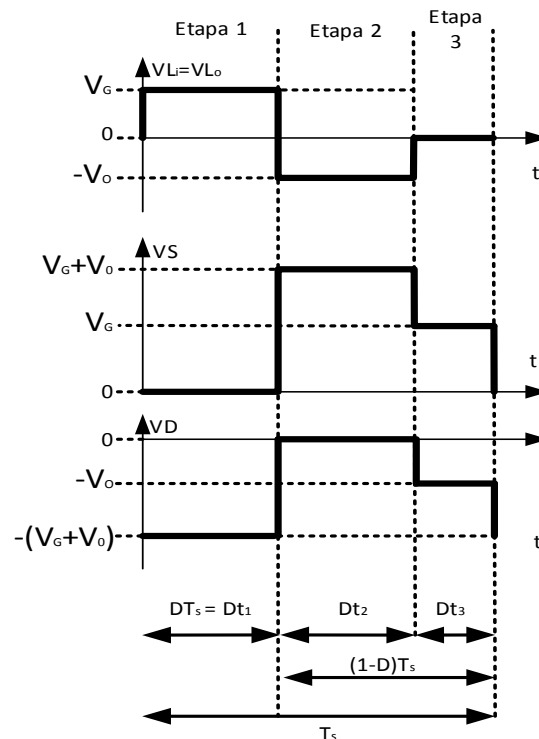


Figura 12. Principais formas de onda de tensão do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 13 ilustra as formas de onda que circula pelos indutores  $L_i$  e  $L_o$ , pelo interruptor, pelo díodo e pelo condensador  $C_i$ .

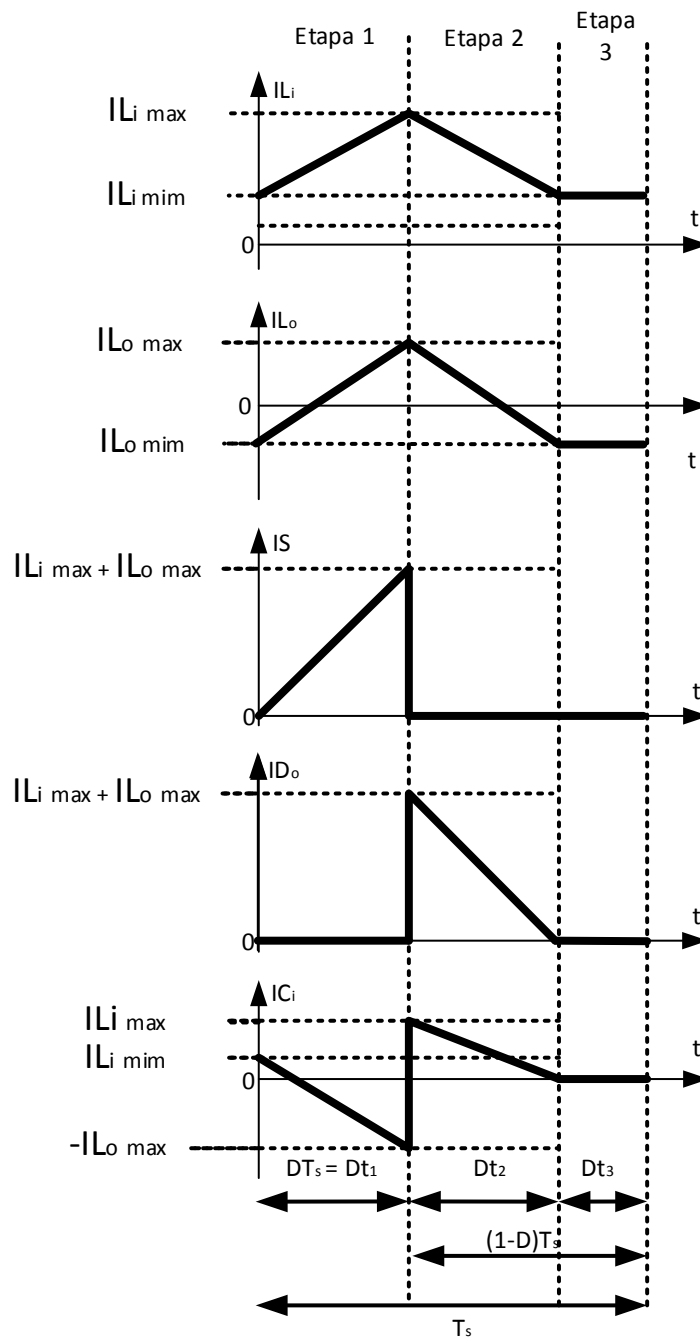


Figura 13. Principais formas de onda de corrente do conversor SEPIC em MCD

- Principais Correntes do conversor SEPIC em MCD.

No final da segunda etapa de operação do conversor, as correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  atingem os seus valores mínimos. Os valores das correntes  $I_{L_{imim}}$  e  $I_{L_{omim}}$ , possuem o mesmo valor, mas com o sentido oposto, podendo ser calculado pela Equação (36)

$$I_{L_{i\text{omim}}} = \frac{D^2 \cdot V_g (V_o \cdot L_i - V_g \cdot L_o)}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (36)$$

A corrente máxima do indutor  $L_i$  ( $I_{L_{i\text{mim}}}$ ) é representada pela Equação (36).

$$I_{L_{i\text{max}}} = \frac{D \cdot V_g \cdot [D \cdot (V_o \cdot L_i - V_g \cdot L_o) + 2 \cdot V_o \cdot L_o]}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (37)$$

A corrente máxima do indutor  $L_o$  ( $I_{L_{o\text{mim}}}$ ) é representada pela Equação (38).

$$I_{L_{o\text{max}}} = \frac{D \cdot V_g \cdot [2 \cdot V_o \cdot L_o - D \cdot (V_o \cdot L_i - V_g \cdot L_o)]}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (38)$$

A corrente média ( $I_{L_{imed}}$ ) e eficaz ( $I_{L_{ief}}$ ) do indutor  $L_i$  são representadas na Equação (39) e Equação (40), respetivamente.

$$I_{L_{imed}} = \frac{D^2 \cdot V_g \cdot (L_i + L_o)}{2 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (39)$$

$$I_{L_{ief}} = \sqrt{\frac{D^3 \cdot V_i^2 \cdot [4 \cdot V_o \cdot L_o^2 (V_o + V_o) + 6 \cdot V_o \cdot L_o \cdot D \cdot (V_o \cdot L_i - V_g \cdot L_o) + 3 \cdot D \cdot (V_o^2 \cdot L_i^2 - V_g^2 \cdot L_o^2)]}{12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s}} \quad (40)$$

A corrente média ( $I_{L_{omed}}$ ) e eficaz ( $I_{L_{oef}}$ ) do indutor  $L_o$  são representadas na Equação (41) e Equação (42), respetivamente.

$$I_{L_{omed}} = \frac{D^2 \cdot V_g \cdot (L_i + L_o)}{2 \cdot V_o \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (41)$$

$$I_{L_{oef}} = \sqrt{\frac{D^3 \cdot V_g^2 \cdot [4 \cdot V_o \cdot L_i^2 (V_o + V_g) + 6 \cdot V_o \cdot L_i \cdot D \cdot (V_o \cdot L_o - V_g \cdot L_i) + 3 \cdot D \cdot (V_g^2 \cdot L_o^2 - V_o^2 \cdot L_i^2)]}{12 \cdot V_o^2 \cdot L_i^2 \cdot L_o^2 \cdot f_s}} \quad (42)$$

A corrente média ( $I_{S_{med}}$ ) e eficaz ( $I_{S_{ef}}$ ) no interruptor  $S$  são representadas na Equação (43) e Equação (44), respetivamente.

$$I_{S_{med}} = \frac{D^2 \cdot V_g \cdot (L_i + L_o)}{2 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (43)$$

$$I_{S_{ef}} = \frac{D^2 \cdot V_g \cdot (L_i + L_o)}{L_i \cdot L_o \cdot f_s} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (44)$$

A corrente média ( $ID_{med}$ ) e eficaz ( $ID_{ef}$ ) no diodo são representadas na Equação (45) e Equação (46), respectivamente.

$$ID_{med} = \frac{D^2 \cdot V_g^2 \cdot (L_i + L_o)}{2 \cdot L_i \cdot L_o \cdot f_s} \quad (45)$$

$$ID_{ef} = \frac{D \cdot V_g \cdot (L_i + L_o)}{L_i \cdot L_o \cdot f_s} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot Vi}{3 \cdot Vo}} \quad (46)$$

## 2.4. RETIFICADOR SEPIC MCCr

O uso do conversor SEPIC em Modo de Condução Crítica (MCCr) é utilizado para aplicações de baixa potência para correção do fator de potência assim como o conversor SEPIC MCD, porém possui uma maior eficiência [15][16].

O conversor SEPIC MCCr apresenta apenas duas etapas de operação; a primeira etapa é dada quando o interruptor Q1 não está a conduzir. A Figura 14 é uma ilustração da primeira etapa de condução do conversor, onde  $V_{in} = \sqrt{2} V_{in} \sin(\omega t)$  e a tensão retificada é dada por  $V_{ret} = \sqrt{2} V_{in} |\sin(\omega t)|$ . A variável  $\omega$  é a frequência angular da rede.

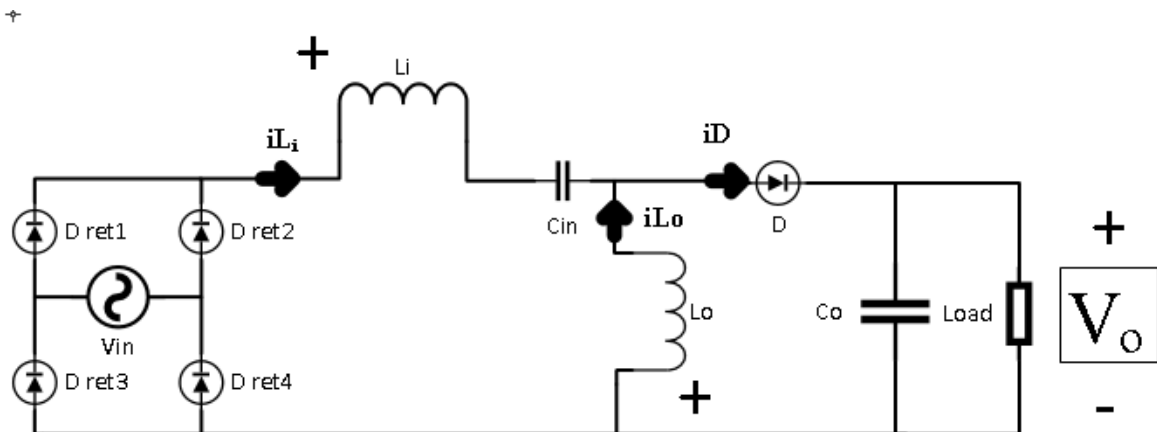


Figura 14. Primeira etapa de condução do conversor SEPIC em modo de condução crítica.

Na primeira etapa de condução, quando o interruptor Q1 não está a conduzir, as correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  decrescem linearmente conforme as equações (47) e (48).

$$\frac{di_{L_i}}{dt} = \frac{V_{L_i}}{L_i} = \frac{V_{C_{in}} + V_O - V_{In}}{L_i} \quad (47)$$

$$\frac{di_{L_o}}{dt} = -\frac{V_{L_o}}{L_o} = \frac{V_o}{L_o} \quad (48)$$

O acionamento do interruptor Q1 é dado quando a corrente do díodo D é igual a 0, ou seja, quando o módulo da corrente  $L_i$  é igual ao módulo da corrente  $L_o$ .

No momento em que a corrente do díodo é igual a zero, é iniciada a segunda etapa de operação, garantido assim o modo de condução crítico.

A segunda etapa de condução é dada quando o interruptor Q1 começa a conduzir. A Figura 15 é a representação do conversor na segunda etapa de condução.

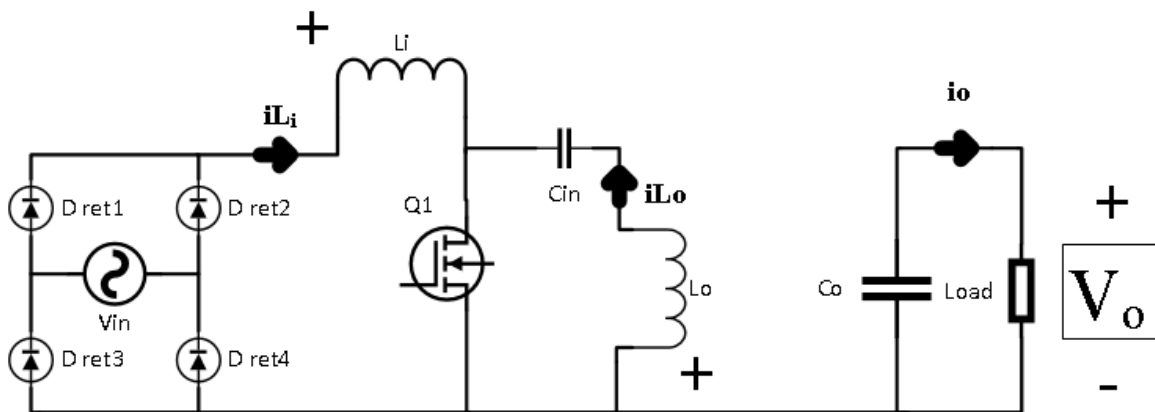


Figura 15. Segunda etapa de condução do conversor SEPIC em modo de condução crítica.

As correntes dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  crescem conforme da Equação (49) e Equação (50) respetivamente.

$$\frac{di_{L_i}}{dt} = \frac{V_{in}}{L_i} \quad (49)$$

$$\frac{di_{L_o}}{dt} = \frac{V_{C_{in}}}{L_o} \quad (50)$$

A Figura 16 é a representação das correntes do interruptor  $I_s$  e a corrente do díodo  $I_D$ , no modo de condução crítico.

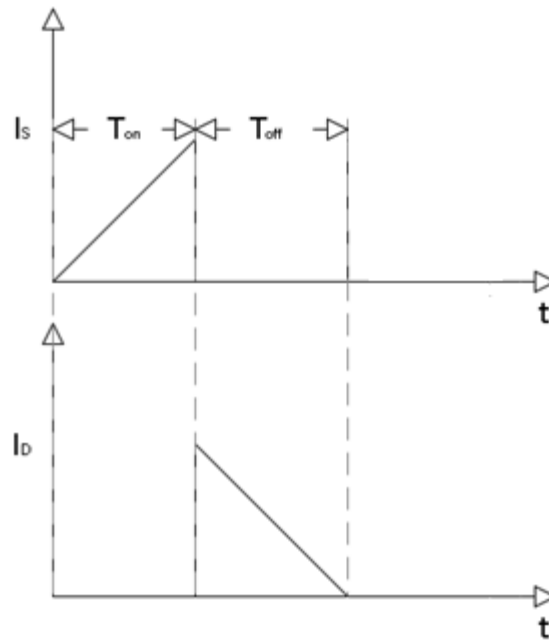


Figura 16. Formas de Corrente do Interruptor e do Díodo do retificador SEPIC em MCCr.

A Figura 17 é um gráfico da evolução das correntes dos indutores  $L_o$  e  $L_i$  do conversor SEPIC.

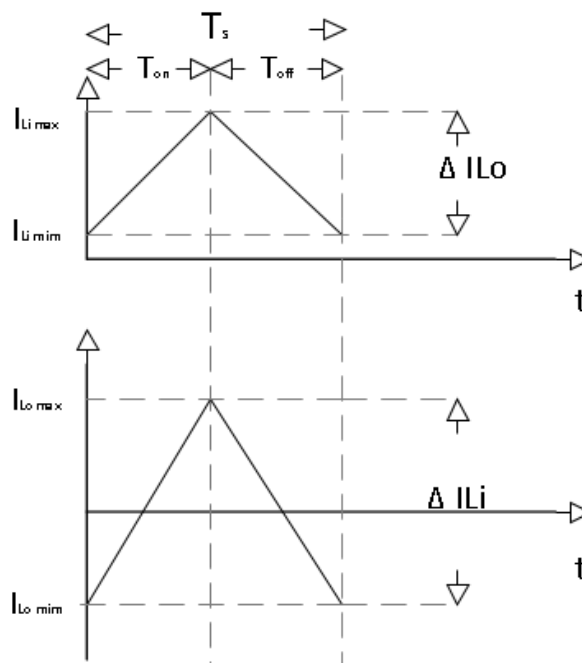


Figura 17. Formas de Corrente dos Indutores  $L_o$  e  $L_i$  do conversor SEPIC em MCCr.

O valor do pico corrente de pico no interruptor,  $i_{Qpk}$  é dado pela Equação (51).

$$I_{Qpk}(t) = \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_o}\right) \cdot V_{in} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot t) \cdot T_{on} \quad (51)$$

A representação da corrente de pico do interruptor Q1 é dada pela Figura 18.

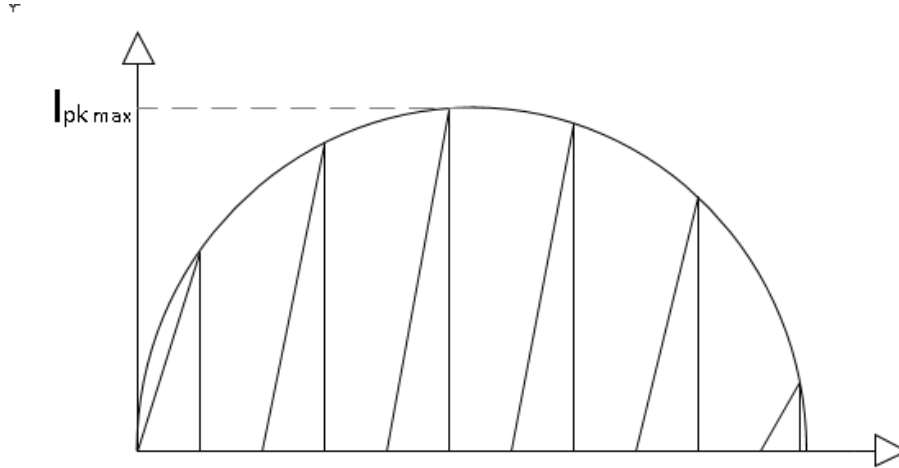


Figura 18. Corrente de Pico do Interruptor Q1 do SEPIC em MCCr.

Diferentemente do conversor SEPIC em modo de condução descontinua, o conversor SEPIC em modo de condução crítica não tem a frequência de comutação fixa, ela é variante no tempo conforme as equações 52 e 53. Deste modo é feita a correção do fator de potência [15][16]. O intervalo de condução varia também conforme a tensão da rede, segundo a Equação (52).

$$T_{on} = \frac{i_{Qpk}}{\sqrt{2} \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_o}\right)} \quad (52)$$

Para o intervalo complementar  $T_{off}$  é utilizada a Equação (53).

$$T_{off} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_i \cdot |\sin(2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot t)| \cdot T_{on}}{V_o} \quad (53)$$

## 2.5. CONVERSOR BOOST EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICO

O retificador BOOST operando em MCCr e em MCD funciona como um PFC (Corretor de Fator de Potência). O modo de condução crítico é obtido no instante que a corrente do diodo chega a zero o interruptor é acionado, representado na Figura 19. Para isto ser obtido, diferentemente do acionamento do interruptor do MCD a frequência de comutação

é variável, ela depende da tensão de saída, do valor instantâneo de tensão retificada, a frequência da rede e do período de que o interruptor é acionado como é demonstrado na Equação (54) [17].

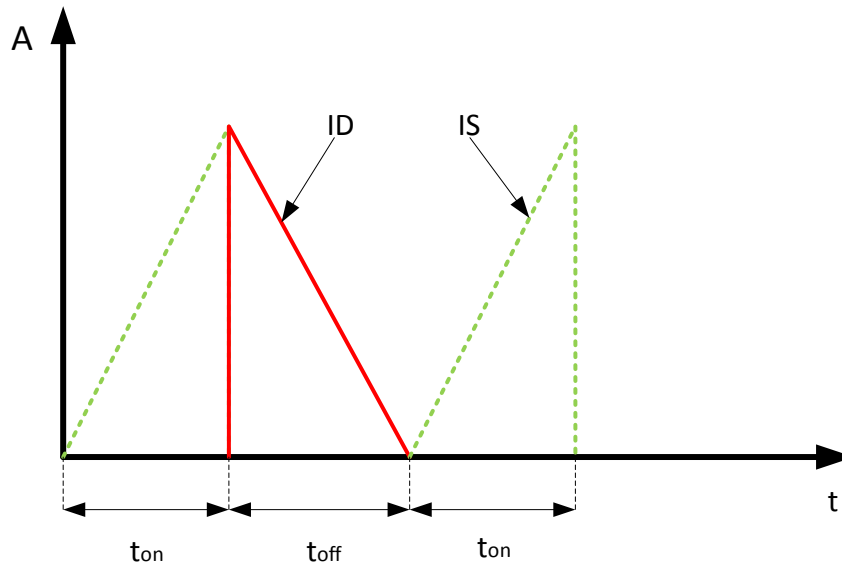


Figura 19. Representação do acionamento do interruptor no Boost.

$$f_{sw} = \frac{1}{t_{on}} \cdot \frac{V_{out} - V_{in.PK} \cdot |\sin(2 \cdot \pi \cdot f_{line} \cdot t)|}{V_{out}} \quad (54)$$

Em regime permanente, o período em que o interruptor fica acionando é o mesmo, indiferentemente da frequência de comutação [18].

## 2.6. INVERSOR DE MEIA PONTE

Nesta seção são apresentados os princípios de funcionamento do inversor de meia ponte, a análise foi baseada em [19].

### 2.6.1. INVERSOR DE MEIA PONTE PARA CARGA RESISTIVA

Existem duas etapas de condução quando a carga é puramente resistiva, a primeira quando o interruptor S1 é acionado e o interruptor S2 encontra-se bloqueado, como representado na Figura 20.

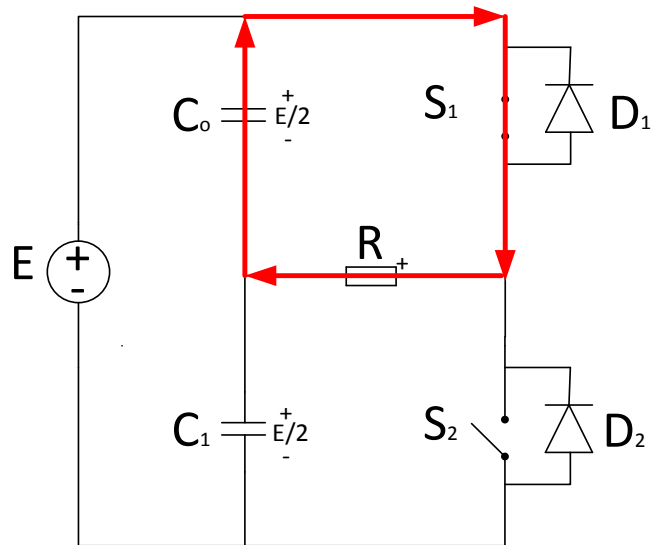


Figura 20. Primeira etapa de condução do inversor de meia ponte.

E a segunda etapa de condução é quando o interruptor S1 é bloqueado e o interruptor S2 é acionado, assim representado na Figura 21.

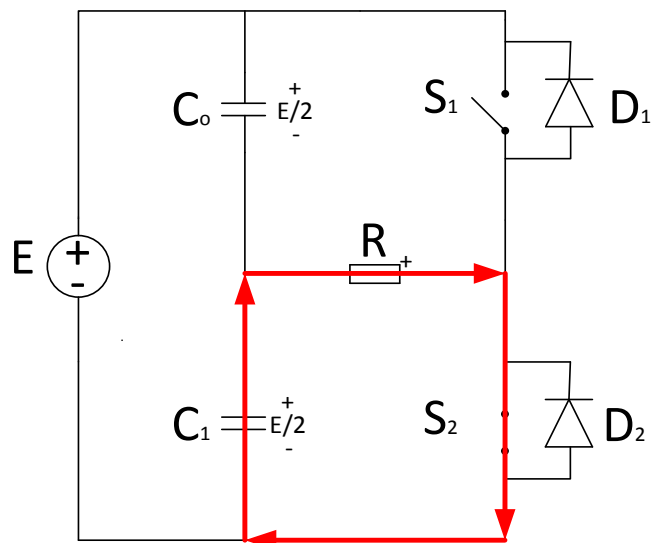


Figura 21. Segunda etapa de condução do inversor de meia ponte.

A forma de onda de tensão e de corrente do inversor de meia ponte são ilustradas pela Figura 22.

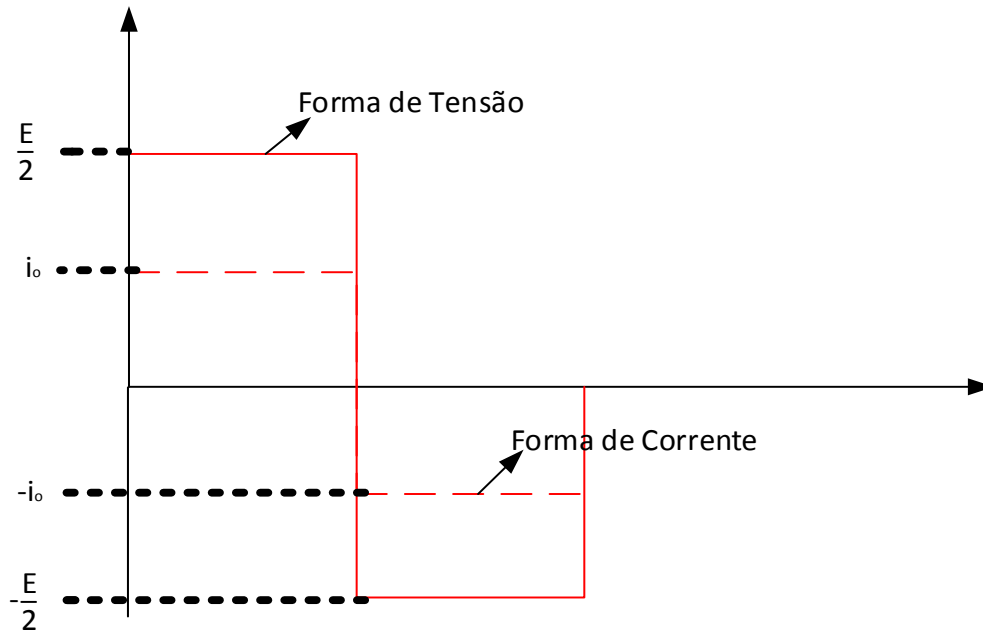


Figura 22. Saída de Tensão e Corrente do Inversor de meia ponte para carga resistiva.

### 2.6.2. INVERSOR DE MEIA PONTE PARA CARGA RL

Quando na carga é acrescentado um indutor para filtrar os harmônicos de corrente, o inversor de meia ponte passa a apresentar mais duas etapas de condução.

Na primeira etapa de condução, representada na Figura 23, o mosfet S1 é acionado enquanto o mosfet S2 se encontra bloqueado.

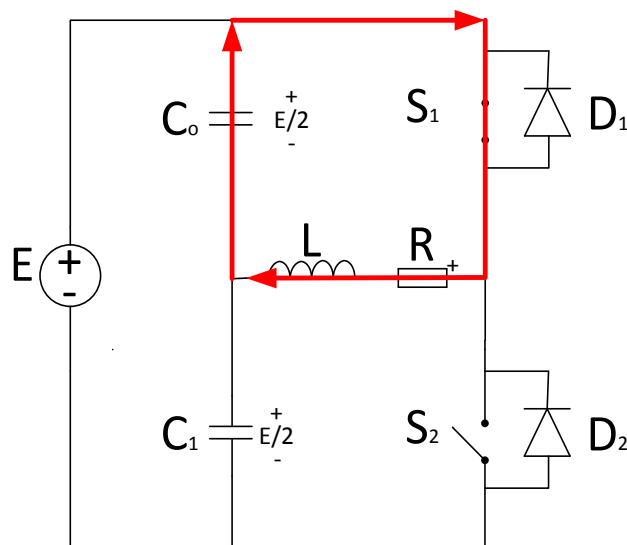


Figura 23. Primeira etapa de condução para carga RL.

A Equação (55) é o comportamento da corrente nesta etapa.

$$i_o = \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (55)$$

A segunda etapa de condução, representada na Figura 24, o mosfet S1 é bloqueado e o mosfet S2 é acionado. Como o indutor não permite a variação instantânea de corrente a corrente passa a conduzir pelo diodo antiparalelo.

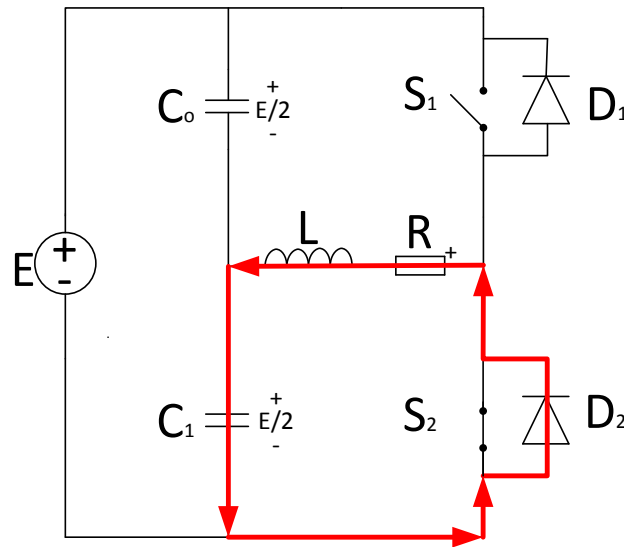


Figura 24. Segunda etapa de condução para carga RL.

A Equação (56) é o comportamento da corrente nesta etapa.

$$i_o = -\frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (56)$$

Na terceira etapa de condução, representada na Figura 25, a corrente na carga inverte-se (é negativa agora) assim a corrente passa a conduzir pelo mosfet S2.

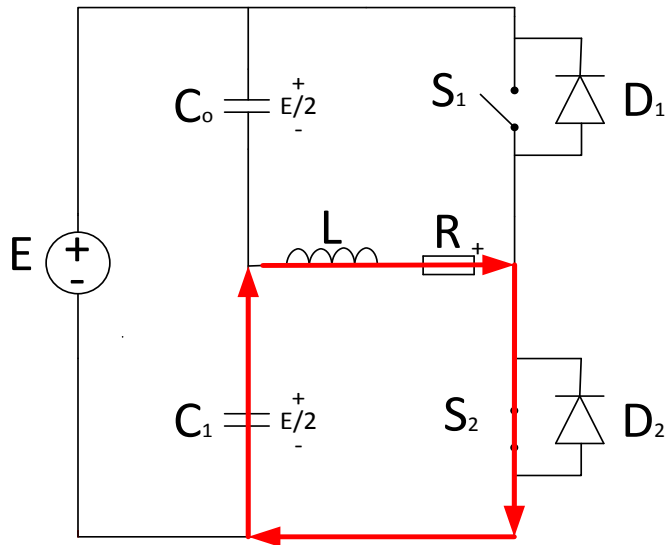


Figura 25. Terceira etapa de condução para carga RL.

A Equação (57) é o comportamento da corrente nesta etapa.

$$i_o = -\frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (57)$$

A quarta etapa de condução, representada na Figura 26, o mosfet S2 é bloqueado e o mosfet S1 é acionado. Como o indutor não permite a variação instantânea de corrente a corrente passa a conduzir pelo diodo antiparalelo enquanto se mantiver negativa. Quando a corrente se inverter conduz S1 repetindo-se o ciclo.

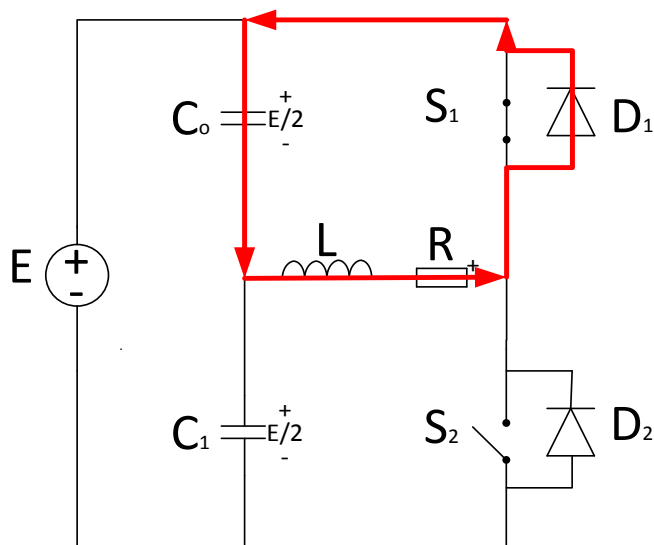


Figura 26. Quarta etapa de condução para carga RL.

A Equação (58) é o comportamento da corrente nesta etapa.

$$i_o = \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \frac{E}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (58)$$

A Figura 27 representa a forma de onda de tensão (linha contínua) e corrente (linha pontilhada) da carga RL.

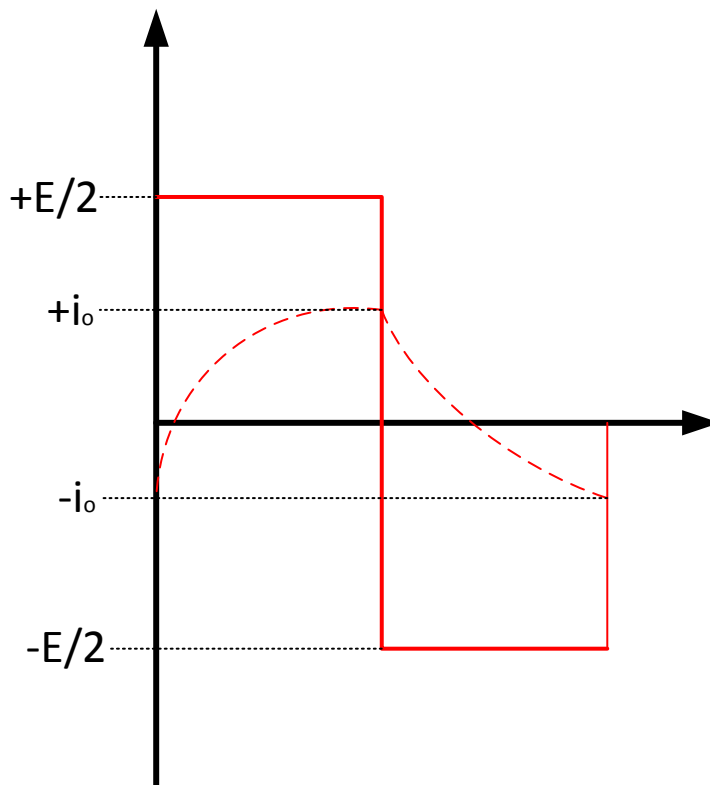


Figura 27. Forma de tensão e corrente sobre a carga RL.

## 2.5. I-LFSQW

Como observado na

Figura 1, a corrente se mantém em zero por algum período. Assim, para manter a potência média de saída, o valor de pico atual é alto. Neste caso, durante o tempo em que os LEDs são reenergizados, o fluxo luminoso e a vida útil do componente são reduzidos. Para resolver esse problema, propomos alimentar os LEDs com forma de onda quadrada usando

a modulação I-LFSQW [20][21]. A Figura 28 mostra de forma simplificada como é feita a modulação PWM.

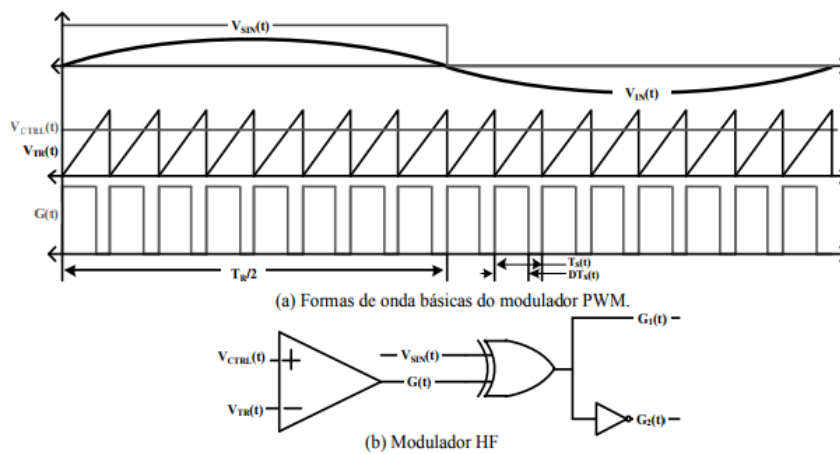


Figura 28. Modulação I-LFSQW.

## 2.6. LÂMPADAS LED

O uso de lâmpadas LED vem sendo cada vez mais utilizado para a substituição das lâmpadas convencionais (lâmpadas incandescentes, fluorescentes e fosforescentes), devido ao fato de possuírem um excelente índice de reprodução e também terem um grande potencial para diminuir o consumo de eletricidade [22]. A Figura 29 é a representação do modelo elétrico de um LED.

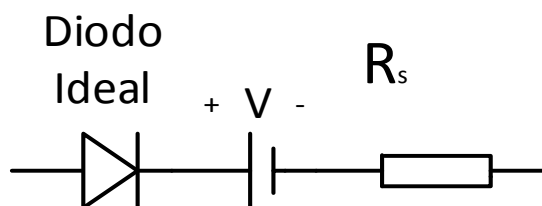


Figura 29. Modelo elétrico de um LED.

O funcionamento do LED é dado pela injeção de portadores em uma junção  $p-n$ . Quando a uma polarização no sentido direto, os elétrons do lado  $n$  se movem para o lado  $p$  e os buracos do lado  $p$  se movem para o lado  $n$ , ambos em direção à região de depleção. Os buracos que se moveram para o lado  $n$  se combinam com os elétrons que estão chegando à região de depleção, já os elétrons que foram injetados no lado  $p$  se recombinam com os buracos deste lado. Todas essas recombinações geram uma camada de espessura  $L_p$  do lado  $p$  e uma camada de espessura  $L_n$  do lado  $n$ . A recombinação dos elétrons com os buracos

na região de depleção gera fótons [23]. A Figura 30 é a ilustração de como ocorre essa movimentação de elétrons e lacunas gerando as camadas  $L_p$  e  $L_n$  para a produção de fótons.

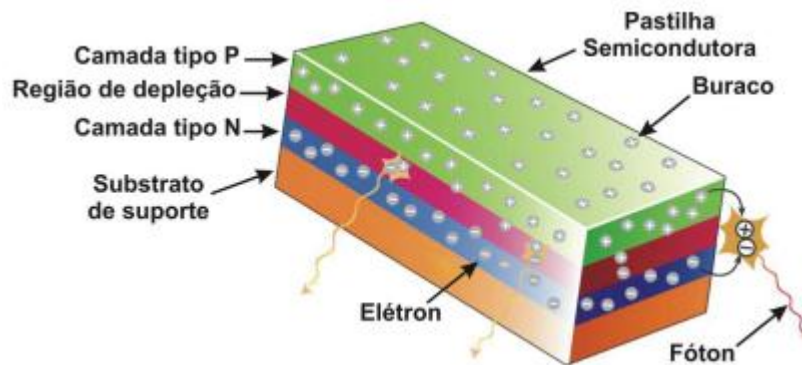


Figura 30. Ilustração da recombinação e da emissão de fótons

Fonte: SÁ JUNIOR, (2007)

Os semicondutores à base de silício e germânio possuem um *gap* direto, isso é uma característica negativa para este semicondutor porque para além de gerar luz ele gera também calor. Para contornar esta situação são utilizados semicondutores *gap* indireto como GaAs, InAs, InP, PbS, CdS e CdTe e AISb.

A geração da luz branca pode ser obtida de três diferentes formas:

- RGB: Neste modo são combinadas as cores vermelha ('R' de *Red*), verde ('G' de *Green*) e azul ('B' de *Blue*), nesse método é possível ajustar a intensidade luminosa;
- LED azul coberto por uma camada de fósforo amarelo: conhecido como LED branco PC (*Phosphor-Covered*) é utilizada uma camada de fósforo onde parte do espectro da luz azul passa por essa camada e a outra parte é convertida na parte complementar do espectro, gerando uma luz branca de alta temperatura luminosa;
- LED ultravioleta coberto por uma camada de fósforo: similar às lâmpadas fluorescentes, o espectro ultravioleta é convertido pela camada de fósforo nas cores primárias para obter a Luz Branca.

A camada p do LED é a maior responsável pelas perdas ôhmicas, devido à sua baixa condutividade elétrica. O fato de não possibilitar um bom fluxo de corrente acaba gerando uma resistência em série intrínseca do modelo elétrico de um LED. Esta resistência intrínseca do LED é a responsável por determinar a potência do LED, as cores dos LED

influenciam na resistência série. Por exemplo, as cores azul e verde de GaInN possuem uma maior resistência intrínseca quando comparado com os LED vermelho e âmbar de ALGAINP [23].

Algumas possíveis soluções para diminuir a perda ôhmica dos LED são [23]:

- Aumento da temperatura: o aumento da temperatura proporciona um aumento de condutividade elétrica na camada p;
- Modificação dos elétrodos: tentar reduzir o percurso da corrente, A Figura 31 mostra o caminho convencional em (a) e em (b) uma possível solução;

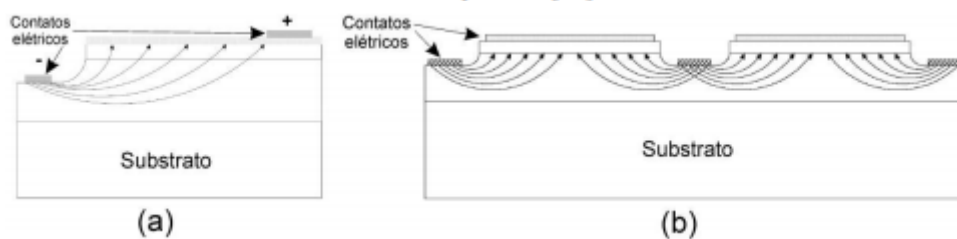


Figura 31. Exemplos dos caminhos percorridos pelos elétrons em elétrodos: convencional (a), modificado (b).

Fonte: SÁ JUNIOR, (2007)

- Modificação da geometria dos contatos elétricos: A modificação dos contatos tem como objetivo equilibrar as perdas ôhmicas com a quantidade de luz refletida. A Figura 32 mostra alguns exemplos de geometrias de contatos em LEDs de alto brilho.

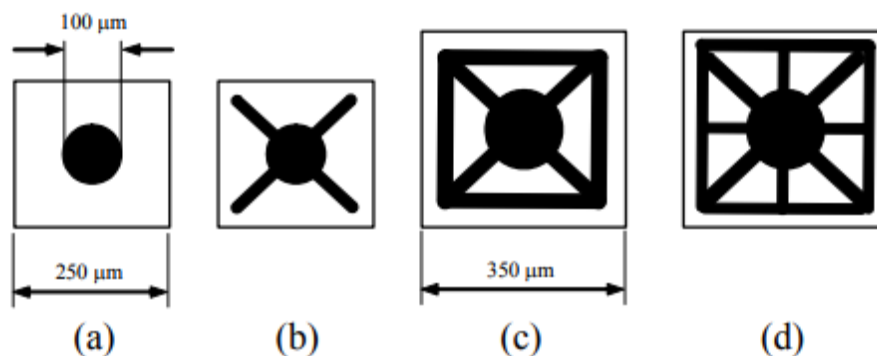


Figura 32. Exemplos de geometria de contatos em LED.

Fonte: SÁ JUNIOR, (2007)



### 3. METODOLOGIA, MATERIAIS E PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC

Neste capítulo será abordada a metodologia do projeto e os cálculos para chegar aos parâmetros empregados no conversor.

A Figura 33 é uma representação simplificada do circuito a ser estudado. É uma topologia integrada de um retificador SEPIC com um inversor de meia ponte. Note que o condensador de saída ( $C_o$ ) do barramento CC do retificador SEPIC é substituído por dois condensadores, formando o barramento CC do inversor de meia ponte.

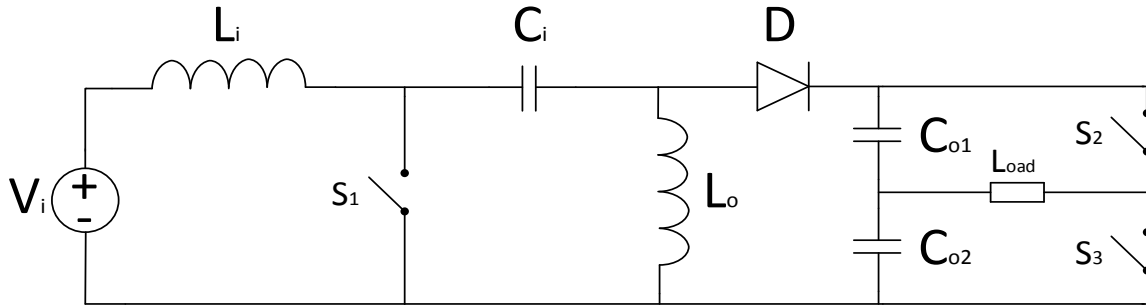


Figura 33. Topologia integrada de um retificador SEPIC e um inversor de meia ponte

### 3.1. PROJETO DO RETIFICADOR SEPIC EM MCD

O SEPIC é uma das principais topologias empregadas para o uso de correção do fator de potência em sistemas de LEDs.

Para calcular os valores da razão cíclica, indutância  $L_i$  e  $L_o$  e condensadores  $C_i$  e  $C_o$  é necessário primeiramente os requisitos de projeto, dado na Tabela 3. Este conversor foi projetado para funcionar nas tensões de 90 V até 240 V.

Tabela 3. Especificações do conversor SEPIC em MCD

Variável	Sigla	Valor	Unidade
Potência do Conversor	$P_o$	50,8	W
Tensão de Entrada Mínima	$V_{in\ min}$	90	V
Tensão de Entrada Máxima	$V_{in\ max}$	240	V
Tensão de Saída	$V_{out}$	127	V
Corrente de Saída	$I_o$	400	mA
Frequência de Comutação	$f_s$	50	kHz
Frequência da Rede	$f_r$	50	Hz
Ondulação Máxima de Corrente Indutor L1	$\Delta I_{L1}$	15	%
Ondulação Máxima de Tensão	$\Delta V_o$	35	%

O primeiro passo para definir os valores dos componentes do retificador SEPIC foi calcular os valores de pico da tensão de entrada.

$$V_{in\ pico\ min} = V_{in\ min} \cdot \sqrt{2} \quad (59)$$

$$V_{in\ pico\ max} = V_{in\ max} \cdot \sqrt{2} \quad (60)$$

O valor médio da tensão de saída é calculado na Equação (61).

$$V_{omed} = \frac{V_{omim}}{\left(1 - \frac{\Delta V_o}{2}\right)} \quad (61)$$

O ganho estático máximo  $q_{max}$  e o ganho estático mínimo  $q_{mim}$  são representados respetivamente pela Equação (62) e Equação (63).

$$q_{max} = \frac{V_{omed}}{V_{inpicomim}} \quad (62)$$

$$q_{mim} = \frac{V_{omed}}{V_{inpicomax}} \quad (63)$$

### 3.1.1 Cálculo de $L_o$

Para calcular o valor de  $L_o$  é calculado primeiramente o valor da corrente de barramento mínimo crítico ( $I_{o\_barramento\_mim\_critico}$ ) pela Equação (64) e o valor mínimo de  $L_o$  ( $LO_{mim}$ ) pela Equação (65).

$$I_{o\_barramento\_mim\_critico} = \frac{q_{max}}{(1 + q_{max})^2} \quad (64)$$

$$LO_{mim} = \frac{I_{o\_barramento\_mim\_critico}}{4 \cdot f_s \cdot I_o} \quad (65)$$

O valor da corrente de barramento máximo crítico ( $I_{o\_barramento\_max\_critico}$ ) pela Equação (66) e o valor máximo de  $L_o$  ( $LO_{max}$ ) pela Equação (67).

$$I_{o\_barramento\_max\_critico} = \frac{q_{mim}}{(1 + q_{mim})^2} \quad (66)$$

$$LO_{max} = \frac{I_{o\_barramento\_max\_critico}}{4 \cdot f_s \cdot I_o} \quad (67)$$

O valor utilizado para a indutância  $L_o$  é o de menor valor.

### 3.1.2 Correntes de Saída Parametrizadas Máxima e Mínima

Primeiramente foi calculado o valor máximo da corrente  $I_o$  de barramento ( $I_{o\_barramento\_max}$ ) e o valor mínimo da corrente  $I_o$  ( $I_{o\_barramento\_mim}$ ), respetivamente pela Equação (68) e pela Equação (69).

$$I_{o\_barramento\_max} = \frac{4 \cdot f_s \cdot L_o \cdot I_o}{V_{inpicomim}} \quad (68)$$

$$I_{o\_barramento\_mim} = \frac{4 \cdot f_s \cdot L_o \cdot I_o}{V_{inpicomax}} \quad (69)$$

### 3.1.3 Razão Cíclica Máxima e Mínima

A razão cíclica máxima ( $D_{max}$ ) é representada pela Equação (70) e a razão cíclica mínima ( $D_{mim}$ ) é representada pela Equação (71).

$$D_{max} = \sqrt{q_{max} \cdot I_{o\_barramento\_max}} \quad (70)$$

$$D_{mim} = \sqrt{q_{max} \cdot I_{o\_barramento\_mim}} \quad (71)$$

### 3.1.4 Valor de pico máximo e mínimo da corrente de entrada

A corrente de entrada varia conforme a tensão de entrada, essa variável é importante para o cálculo da indutância de entrada  $L_i$ .

A corrente de pico de entrada máxima ( $I_{in\_pico\_max}$ ) é representada pela Equação (72) e a corrente de pico de entrada mínimo ( $I_{in\_pico\_mim}$ ) é representada pela Equação (73).

$$I_{in\_pico\_max} = \frac{q_{max} \cdot I_{o\_barramento\_mim}}{2 \cdot f_s \cdot L_2} \quad (72)$$

$$I_{in\_pico\_mim} = \frac{q_{mim} \cdot I_{o\_barramento\_max}}{2 \cdot f_s \cdot L_2} \quad (73)$$

### 3.1.5 Cálculo da Indutância $L_i$

Primeiramente foi calculado a variação máxima de corrente no indutor ( $\Delta I_{L_{i_{max}}}$ ) para o caso de menor tensão, representada pela Equação (74).

$$\Delta I_{L_{i_{max}}} = \Delta I_{L1} \cdot I_{in\_pico\_max} \quad (74)$$

A indutância para o caso de menor tensão ( $L_{imim}$ ) é representada pela Equação (75).

$$L_{imim} = \frac{D_{max} \cdot V_{inpicomim}}{f_s \cdot \Delta I_{L_{i_{max}}}} \quad (75)$$

Primeiramente foi calculado a variação máxima de corrente no indutor ( $\Delta I_{L_{i_{mim}}}$ ) para o caso de maior tensão, representada pela Equação (76).

$$\Delta I_{L_{i_{mim}}} = \Delta I_{L1} \cdot I_{in\_pico\_mim} \quad (76)$$

A indutância para o caso de maior tensão ( $L_{i\max}$ ) é representada pela Equação (77).

$$L_{i\max} = \frac{D_{\max} \cdot V_{\text{inpicomax}}}{f_s \cdot \Delta I L_{i\min}} \quad (77)$$

Neste caso é utilizado o valor maior valor de indutância.

### 3.1.6 Cálculo da Capacidade $C_i$

A variação média para a entrada de menor tensão ( $\Delta V_{C_{i\_med\_mim}}$ ) é dada pela Equação (78).

$$\Delta V_{C_{i\_med\_mim}} = V_{\text{inpicomim}} \quad (78)$$

A variação mínima de tensão sobre o condensador de entrada  $C_i$  para a menor tensão de entrada é dada pela Equação (79).

$$\Delta V_{C_{i\_mim}} = \Delta V_{C1} \cdot \Delta V_{C_{i\_med\_mim}} \quad (79)$$

O cálculo para o maior valor de capacidade de entrada ( $C_{i\max}$ ) é representada pela Equação (80).

$$C_{i\max} = \frac{(1 - \sqrt{q_{\max} \cdot I_{o\_barramento\_max}}) \cdot q_{\max} \cdot I_{o\_barramento\_max}}{2 \cdot f_s^2 \cdot L_2 \Delta V_{C_{i\_mim}}} \quad (80)$$

A variação média para a entrada de maior tensão ( $\Delta V_{C_{i\_med\_max}}$ ) é dada pela Equação (81).

$$\Delta V_{C_{i\_med\_max}} = V_{\text{inpicomax}} \quad (81)$$

A variação mínima de tensão sobre o condensador de entrada  $C_i$  para a maior tensão de entrada é dada pela Equação (82).

$$\Delta V_{C_{i\_max}} = \Delta V_{C_i} \cdot \Delta V_{C_{i\_med\_max}} \quad (82)$$

O cálculo para o menor valor de capacidade de entrada ( $C_{i\min}$ ) é representada pela Equação (83).

$$C_{i\min} = \frac{(1 - \sqrt{q_{\min} \cdot I_{o\_barramento\_mim}}) \cdot q_{\min} \cdot I_{o\_barramento\_mim}}{2 \cdot f_s^2 \cdot L_2 \Delta V_{C_{i\_max}}} \quad (83)$$

Para este caso utiliza-se o maior valor de  $C_i$ .

### 3.1.7 Cálculo da Capacidade $C_o$

A variação de tensão de saída é dada pela Equação (84)

$$\Delta V_{Co} = \Delta V_o \cdot V_{omed} \quad (84)$$

O cálculo da capacidade de saída para a menor tensão de entrada é dado pela Equação (85).

$$C_{omim} = \frac{I_{o\_barramento\_max} \cdot V_{inpicomim}}{8 \cdot \pi \cdot f_r \cdot f_s \cdot L_2 \cdot \Delta V_{Co}} \quad (85)$$

O cálculo da capacidade de saída para a maior tensão de entrada é dado pela Equação (86).

$$C_{omax} = \frac{I_{o\_barramento\_min} \cdot V_{inpicomax}}{8 \cdot \pi \cdot f_r \cdot f_s \cdot L_2 \cdot \Delta V_{Co}} \quad (86)$$

Para este caso utiliza-se o maior valor de capacidade.

## 3.2. RESULTADOS DO PROJETO DO CONVERSOR SEPIC EM MCD

Nesta seção será definido as escolhas de quais componentes serão utilizados.

A Tabela 3 são os principais parâmetros obtidos do conversor SEPIC em MCD, por aplicação das fórmulas apresentadas em 3.1 e de acordo com as especificações definidas para o conversor.

**Tabela 4. Valores obtidos para o retificador SEPIC em MCD**

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Tensão média de Saída	$V_{omed}$	128,65	V
Razão Cíclica Máxima	$D_{max}$	0,503	-
Razão Cíclica Mínima	$D_{min}$	0,189	-
Indutância Máxima $L_i$	$L_{imax}$	21,1	mH
Indutância Mínima $L_i$	$L_{imim}$	7,9	mH
Indutância Máxima $L_o$	$L_{omax}$	845,6	$\mu$ H
Indutância Mínima $L_o$	$L_{omim}$	397,73	$\mu$ H
Condensador Máxima $C_i$	$C_{imax}$	180	nF
Condensador Mínima $C_i$	$C_{imim}$	41	nF
Condensador Máxima $C_o$	$C_{omax}$	55	$\mu$ F
Condensador Mínima $C_o$	$C_{omim}$	55	$\mu$ F

Os valores escolhidos para os indutores e condensadores estão descritos na Tabela 5.

**Tabela 5. Valores Utilizados no Conversor SEPIC em MCD**

Componente	Valor	Unidade
Indutor $L_i$	21	mH
Indutor $L_o$	400	$\mu$ H
Condensador $C_i$	180	nF
Condensador $C_o$	55	$\mu$ F

A Tabela 6 são os valores teóricos das correntes que circulam pelos principais componentes do conversor SEPIC para as tensões de entrada de 230 V e 90 V de acordo com as fórmulas apresentadas em 2.3.2.

**Tabela 6. Valores de corrente dos principais componentes do conversor SEPIC em MCD**

Variável	Sigla	Corrente (A) para a tensão de entrada de 230 V	Corrente (A) para a tensão de entrada de 90 V
Corrente mínima indutor $L_i$	$I_{L_{i_{\min}}}$	0,27	0,78
Corrente média indutor $L_i$	$I_{L_{i_{\text{med}}}}$	0,18	0,515
Corrente máxima indutor $L_i$	$I_{L_{i_{\max}}}$	0,32	0,84
Corrente eficaz indutor $L_i$	$I_{L_{i_{\text{ef}}}}$	0,2	0,57
Corrente mínima indutor $L_o$	$I_{L_{o_{\min}}}$	-0,26	-0,78
Corrente média indutor $L_o$	$I_{L_{o_{\text{med}}}}$	0,35	0,4
Corrente máxima indutor $L_o$	$I_{L_{o_{\max}}}$	2,7	2,67
Corrente eficaz indutor $L_o$	$I_{L_{o_{\text{ef}}}}$	0,8	0,85
Corrente média Interruptor	$I_{S_{\text{ef}}}$	0,28	0,8
Corrente eficaz Interruptor	$I_{S_{\text{med}}}$	0,62	0,66
Corrente média Diodo	$I_{D_{\text{ef}}}$	0,77	0,4
Corrente eficaz Diodo	$I_{D_{\text{med}}}$	0,35	0,86

### 3.3. PROJETO DOS INDUTORES $L_i$ E $L_o$ SEPIC

Nesta seção será demonstrado os passos para o projeto físicos dos indutores  $L_i$  e  $L_o$ . Os valores da corrente eficaz no indutor e a corrente de pico foram obtidas através de simulações.

A Tabela 7 são os parâmetros utilizados para projetar o indutor  $L_i$ .

**Tabela 7. Tabela dos Parâmetros do Indutor  $L_i$**

Parâmetros	Sigla	Valor	Unidade
Indutância dimensionada	$L_o$	21	mH
Frequência de Comutação	$F_s$	50	kHz
Corrente Eficaz no Indutor	$I_{ef}$	0,65	A
Corrente de Pico no Indutor	$I_p$	0,81	A
Fluxo de Indução Máximo	$B$	0,27	T
Densidade Máxima de Corrente	$J$	300	$\frac{A}{cm^2}$
Fator de utilização da área do núcleo	$K_w$	0,7	

A Tabela 8 são os parâmetros utilizados para projetar o indutor  $L_o$ .

**Tabela 8. Tabela dos Parâmetros do Indutor  $L_o$**

Parâmetros	Sigla	Valor	Unidade
Indutância dimensionada	$L_o$	400	mH
Frequência de Comutação	$F_s$	50	kHz
Corrente Eficaz no Indutor	$I_{ef}$	0,85	A
Corrente de Pico no Indutor	$I_p$	2,4	A
Fluxo de Indução Máximo	$B$	0,15	T
Densidade Máxima de Corrente	$J$	250	$\frac{A}{cm^2}$
Fator de utilização da área do núcleo	$K_w$	0,7	

O primeiro passo é definir qual o núcleo a ser utilizado conforme a Equação (87), onde  $L_o$  é a indutância desejada,  $I_{ef}$  é a corrente eficaz que circula pelo indutor,  $I_p$  é a corrente de pico,  $B$  é o fluxo máximo de indução,  $J$  é a densidade máxima de corrente e  $K_w$  é o fator de utilização do núcleo.

$$AeAw = 10^4 \cdot \frac{L_o \cdot I_{ef} \cdot I_p}{B \cdot J \cdot K_w} \quad (87)$$

O valor encontrado dará o tamanho mínimo do núcleo a ser utilizado, conforme a Tabela 9.

**Tabela 9. Tabela de núcleos.**

Núcleo	$A_e(\text{cm}^2)$	$A_w(\text{cm}^2)$	$L_e(\text{cm})$	$L_t(\text{cm})$	$V_e(\text{cm}^3)$	$A_e A_w(\text{cm}^4)$
E – 42/20	2,4	1,57	9,7	10,5	22,3	3,768
E – 30/7	0,6	0,8	6,7	5,6	4	0,48

O número de espiras  $N$  é dado pela Equação (88), onde  $A_e$  é um parâmetro físico do núcleo.

$$N = 10^4 \cdot \frac{L_o \cdot I_p}{B \cdot A_e} \quad (88)$$

O tamanho do entreferro  $I_g$  é estimado, este valor pode ser ajustado durante a construção do indutor para obter o valor de indutância desejada.

$$I_g = 10^{-2} \cdot \frac{N \cdot \mu_o \cdot A_e}{L_o} \quad (89)$$

E por fim será escolhido qual fio e as suas características.

O diâmetro máximo do fio é dado pela Equação (90).

$$D_{fio\_max} = \frac{15}{\sqrt{f_s}} \quad (90)$$

A partir do resultado obtido da Equação (90), será escolhido o condutor na Tabela 10. O parâmetro  $S_{fio}$  é a área do cobre e  $A_s$  é a área de isolamento.

**Tabela 10. Parâmetros do Condutor**

Fio	$D_{fio}(\text{cm})$	$S_{fio}(\text{cm}^2)$	$A_s(\text{cm}^2)$
AWG 21	0,7229	0,004105	0,005004
AWG 25	0,4547	0,001624	0,002078

A quantidade de condutores é dada pela equação:

$$N_{fios} = \frac{I_{ef}}{S_{fio} \cdot J} \quad (91)$$

A Tabela 11 são os valores Calculados das Equações: Equação (87), Equação (88), Equação (89), Equação (90) e Equação (91).

**Tabela 11. Valores Calculados das Equações: Equação (87), Equação (88), Equação (89), Equação (90) e Equação (91)**

Variável	Equação	Indutor Li	Indutor Lo
AeAw	(87)	1,95 cm <sup>2</sup>	0,311 cm <sup>2</sup>
N	(88)	348	107
I <sub>g</sub>	(89)	7 mm	0,2 mm
D <sub>fio_max</sub>	(90)	0,067	0,067
N <sub>fios</sub>	(91)	1	2

A Tabela 12 são os principais parâmetros dos indutores L<sub>i</sub> e L<sub>o</sub> utilizados no conversor SEPIC em MCD.

**Tabela 12. Principais Parâmetros dos Indutores no Conversor SEPIC em MCD**

Indutor	Núcleo	Condutor	Número de condutores	Número de Espiras
Li	E – 42/20	AWG 21	1	348
Lo	E – 30/7	AWG 25	2	107

Os valores das Tabelas 10 e Tabela 11 para o indutor L<sub>o</sub> são diferentes devido ao fato que ao utilizar o condutor AWG 21, não é possível alocar as 107 espiras necessárias para o indutor. Para solucionar tal problema é utilizado 2 condutores em paralelo de AWG 25 para que seja possível alocar as 107 espiras do indutor sem exceder os limites do carretel. O volume de ocupação pode ser estimado pela Equação (92) não é aconselhado este valor ser superior a 70 % do A<sub>w</sub> do indutor.

$$A_{w\_estimado} = \frac{(N_{fios} \cdot N_{espiras} \cdot A_s)}{k_w} \quad (92)$$

### 3.4. ESQUEMA ELÉTRICO, MONTAGEM E COMPONENTES

Nesta seção será apresentado os materiais utilizados no projeto da topologia integrada.

A é o esquema elétrico da topologia integrada. A única mudança para a simulação, foi a utilização dos resistores R1 e R2 de 1 MΩ.

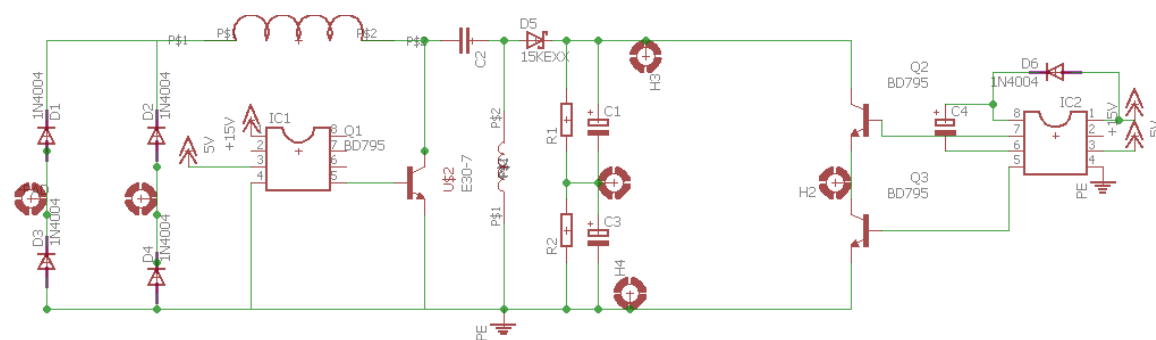


Figura 34. Esquema elétrico do SEPIC em MCD com a topologia integrada.

A Figura 35 é o protótipo da topologia integrada. Os conectores em branco representam a entrada CA do circuito, o conector vermelho a saída positiva do barrento CC do conversor SEPIC, o conector verde é a massa do circuito e os conectores azuis são a saída da topologia integrada. As dimensões da placa utilizada são 125 mm de largura por 105 mm de altura. Os drivers utilizados para os interruptores foram dois IR2104, para o interruptor do retificador SEPIC, foi utilizado a saída LO.

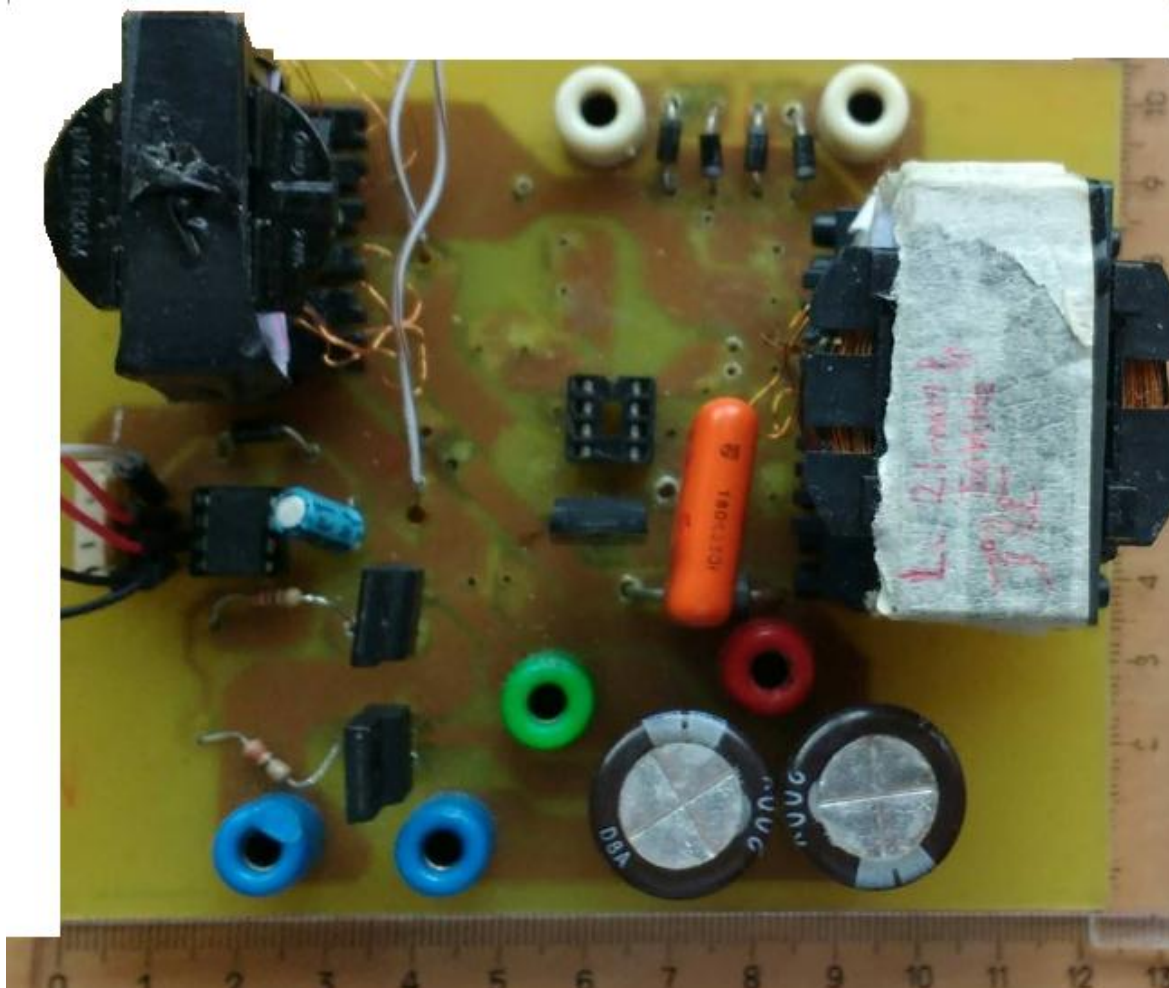


Figura 35. Protótipo da topologia integrada.

A Tabela 13 são os semicondutores utilizados no protótipo da Figura 35.

**Tabela 13. Semicondutores utilizados no protótipo.**

<b>Semicondutor</b>	<b>Referência</b>
Interruptores	K2843
Diodo	F 68G 606Y
Diodo Retificadores	1N4007

A Tabela 14 são os condensadores utilizados no protótipo da Figura 35. Foram escolhidos condensadores maiores do que o projetado, devido a questões de disponibilidade.

**Tabela 14. Condensadores utilizados no protótipo.**

<b>Condensadores</b>	<b>Referência</b>
$C_i$	180 nF 630V
$C_o$	200 $\mu$ F 100V

## 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O CONVERSOR SEPIC EM MCD

Nesta seção é apresentada a simulação do conversor SEPIC, da topologia integrada simulando com uma carga RL e a simulação da topologia integrada com a carga de LEDs CA.

### **4.1 Resultados do Conversor SEPIC em MCD**

Primeiramente foi simulado somente o conversor SEPIC. A Figura 36 é o circuito a ser simulado no ambiente de simulação do ORCAD, onde se usou os valores apresentados na Tabela 5 e uma resistência de carga correspondente à potência de saída de 50,8 W.

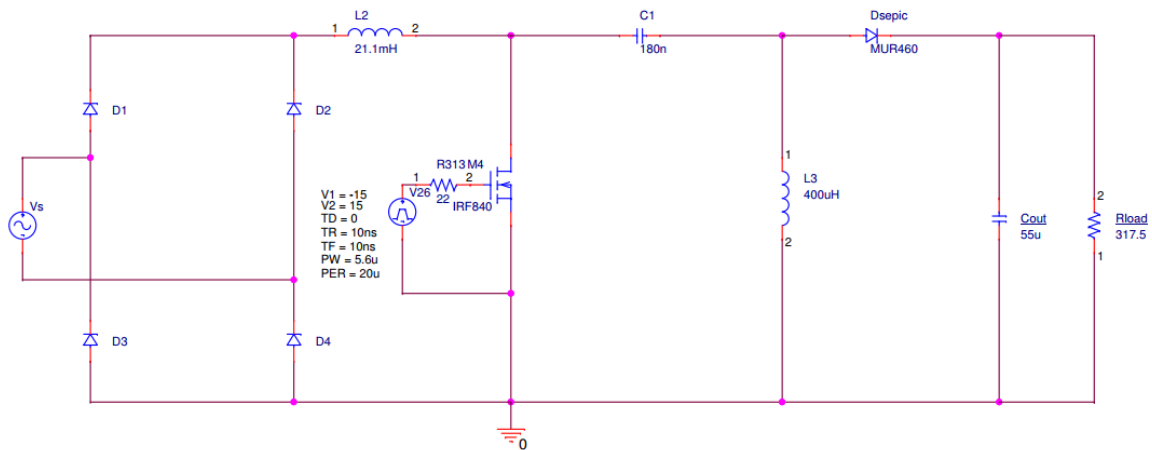


Figura 36. Circuito do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 37 é a representação da tensão de entrada de 230 V eficaz na frequência de 50 Hz e a correspondente corrente de entrada em fase com a tensão, com valor eficaz de corrente de 400 mA.

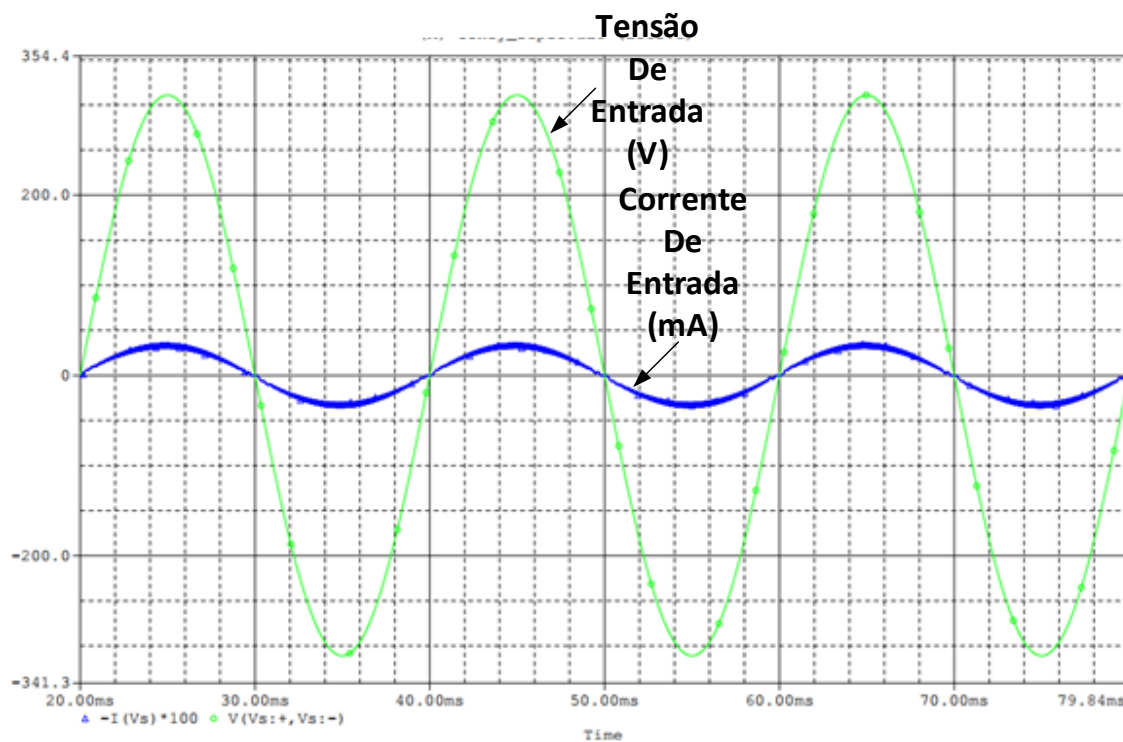


Figura 37. Tensão e Corrente de entrada do conversor SEPIC MCD, a corrente foi amplificada com 100 vezes para uma melhor visualização.

A Figura 38 é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_i$ . A sua amplitude é de cerca de 360 mA e a corrente eficaz medida é de 230 mA.

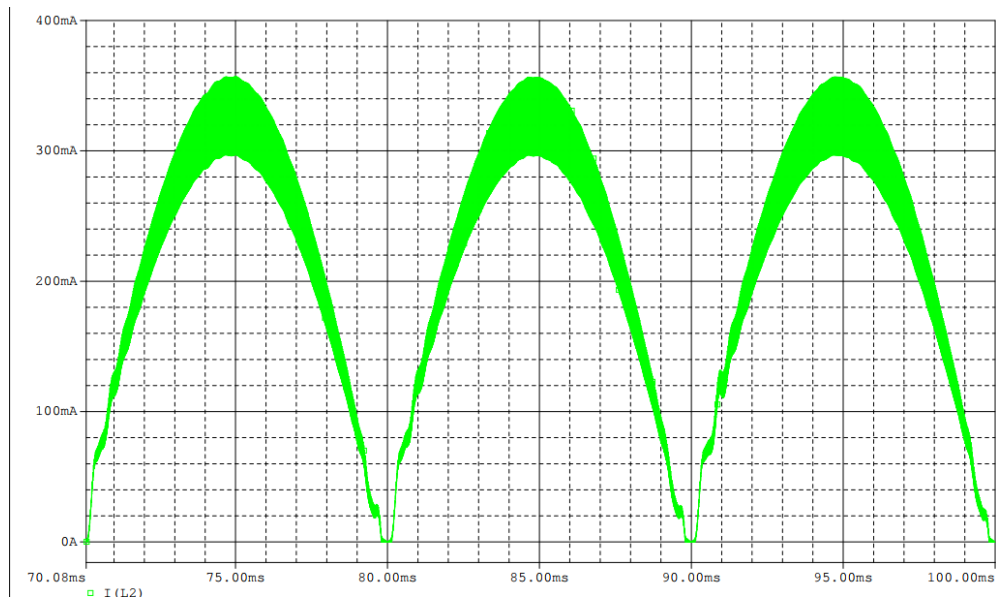


Figura 38 Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em baixa frequência do conversor SEPIC MCD.

A Figura 39 é a resposta da simulação do indutor  $L_i$  em alta frequência, cujos resultados são compatíveis com os apresentados na Figura 11. O seu valor mínimo é de 290 mA e o seu valor máximo é de 355 mA. Estes valores foram obtidos no intervalo quando a corrente é máxima.



Figura 39 Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em alta frequência do conversor SEPIC MCD.

A Figura 40 é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_o$ . Seu valor máximo é de 2,9 A, seu valor mínimo é de  $-300$  mA e o seu valor eficaz é de 900 mA.

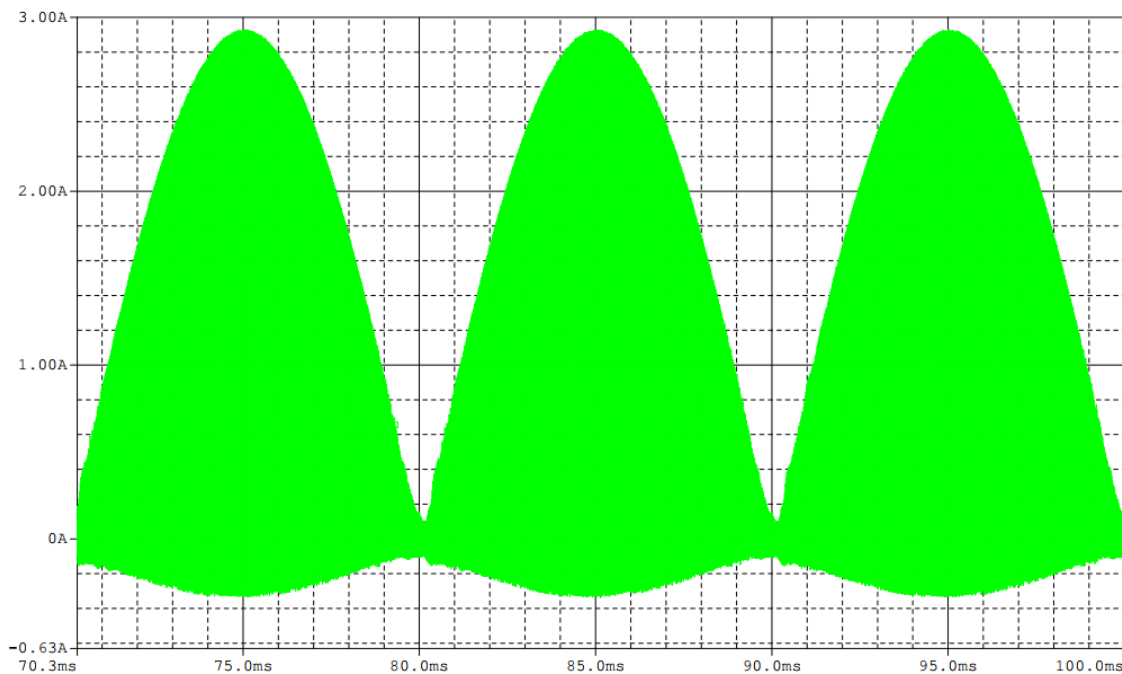


Figura 40. Corrente do indutor  $L_o$  em baixa frequência do conversor SEPIC MCD.

A Figura 41 é a simulação das correntes dos indutor  $L_o$  em alta frequência. Seu valor mínimo é de  $-290$  mA e o máximo é de aproximadamente 3 A.

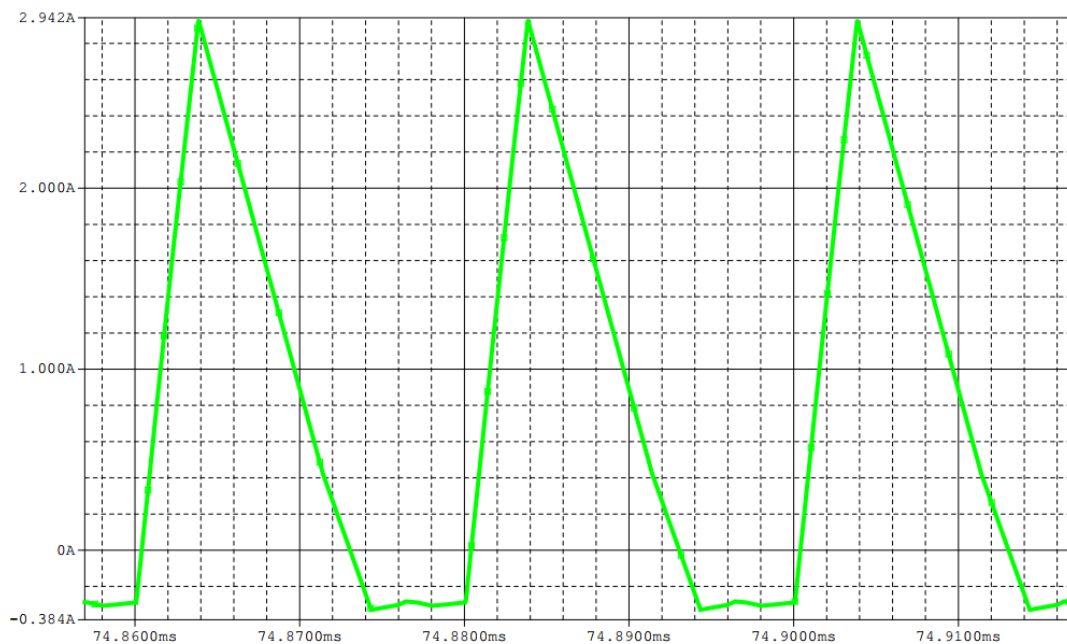


Figura 41. Corrente dos indutor  $L_o$  em alta frequência do conversor SEPIC MCD.

A Figura 42 é a simulação da corrente semicondutores, Mosfet (em verde) e do Díodo (em vermelho). O valor máximo da corrente dos semicondutores é de 3,4 A, a corrente eficaz do díodo é de 900 mA e a corrente eficaz do interruptor é de 600 mA.

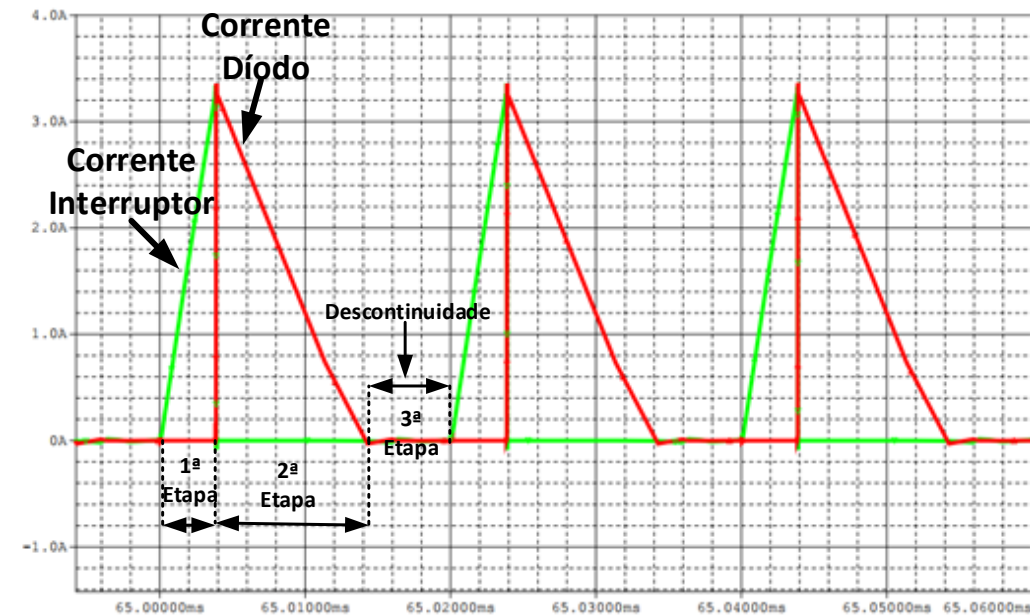


Figura 42. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC MCD.

A Figura 43 é a resposta de simulação para a corrente que percorre o condensador  $C_i$ . O seu valor máximo é de cerca de 360 mA e o seu valor mínimo é de cerca de -2,95 A.

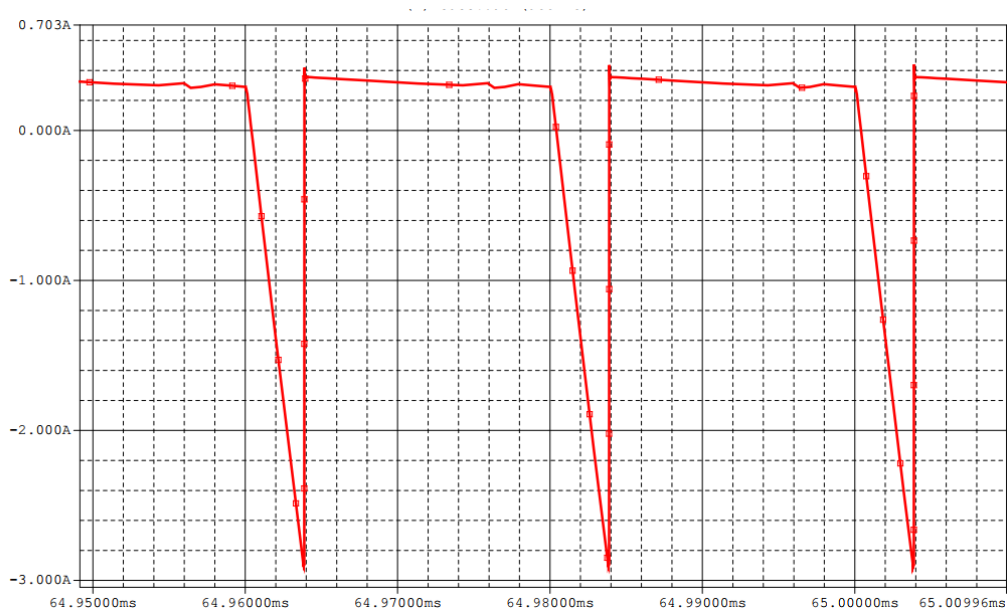


Figura 43. Corrente no Condensador  $C_i$  do conversor SEPIC MCD.

A Figura 44 é a simulação da tensão e corrente de saída. O valor médio da tensão é de 127 V e a ondulação de tensão é de 10 V, o valor médio da corrente é de 400 mA do conversor SEPIC em MCD.

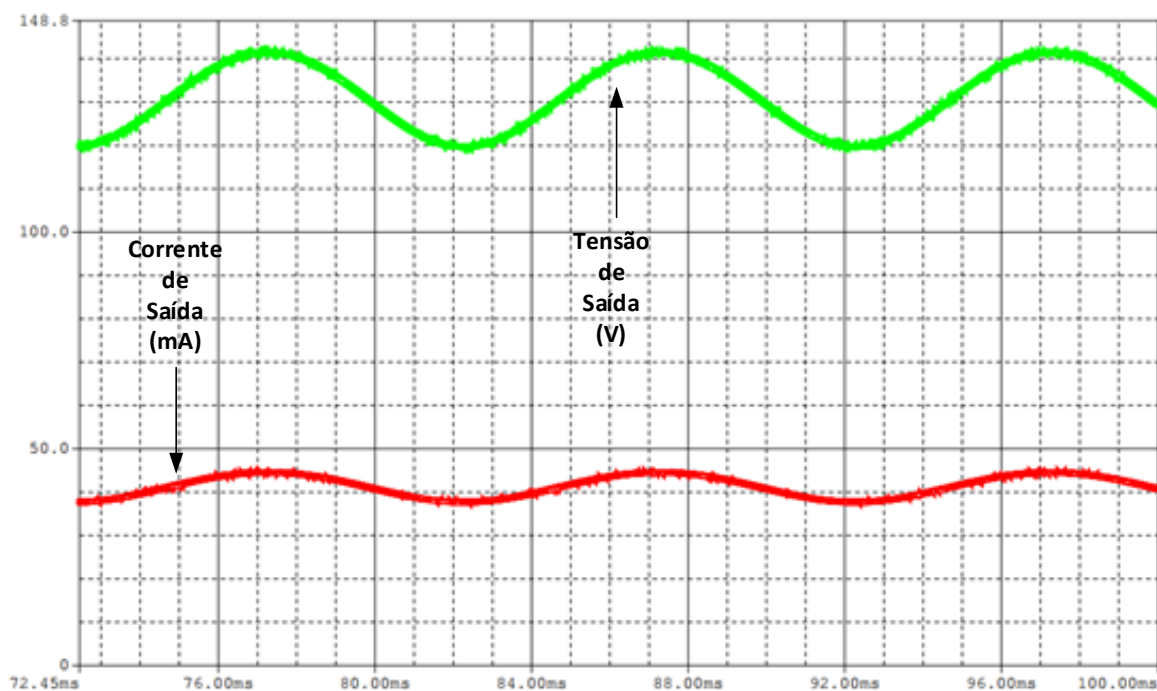


Figura 44. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC MCD.

A Tabela 15 são os valores obtidos em simulação das correntes dos principais componentes do conversor SEPIC.

**Tabela 15. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo SEPIC MCD.**

Variável	Sigla	Corrente (A) para a tensão de entrada de 230 V
Corrente mínima indutor $L_i$	$IL_{i_{\min}}$	0,3
Corrente média indutor $L_i$	$IL_{i_{\text{med}}}$	0,2
Corrente máxima indutor $L_i$	$IL_{i_{\max}}$	0,35
Corrente eficaz indutor $L_i$	$IL_{i_{\text{ef}}}$	0,27
Corrente mínima indutor $L_o$	$IL_{o_{\min}}$	-0,3
Corrente média indutor $L_o$	$IL_{o_{\text{med}}}$	0,46
Corrente máxima indutor $L_o$	$IL_{o_{\max}}$	2,9
Corrente eficaz indutor $L_o$	$IL_{o_{\text{ef}}}$	0,97
Corrente média Interruptor	$IS_{\text{ef}}$	0,2
Corrente eficaz Interruptor	$IS_{\text{med}}$	0,6
Corrente média Diodo	$ID_{\text{ef}}$	0,85
Corrente eficaz Diodo	$ID_{\text{med}}$	0,35

A Figura 45 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_i$ . O seu valor máximo é de 340 V e o mínimo de -127 V.

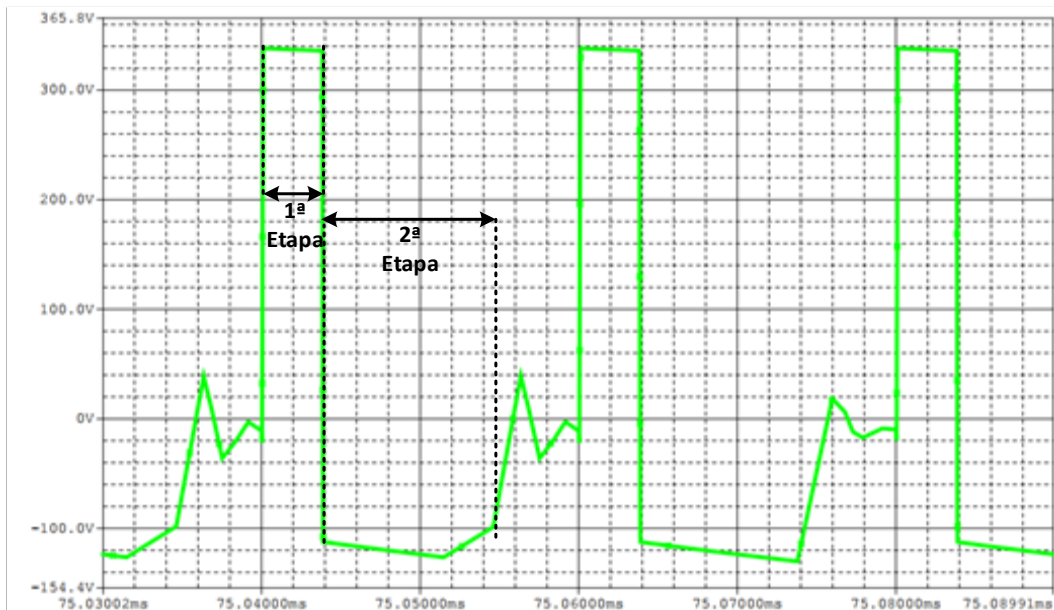


Figura 45. Tensão Sobre o Indutor  $L_i$  do conversor SEPIC MCD.

A Figura 46 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_o$ . O seu valor máximo é de 350 V e o mínimo de -180 V.

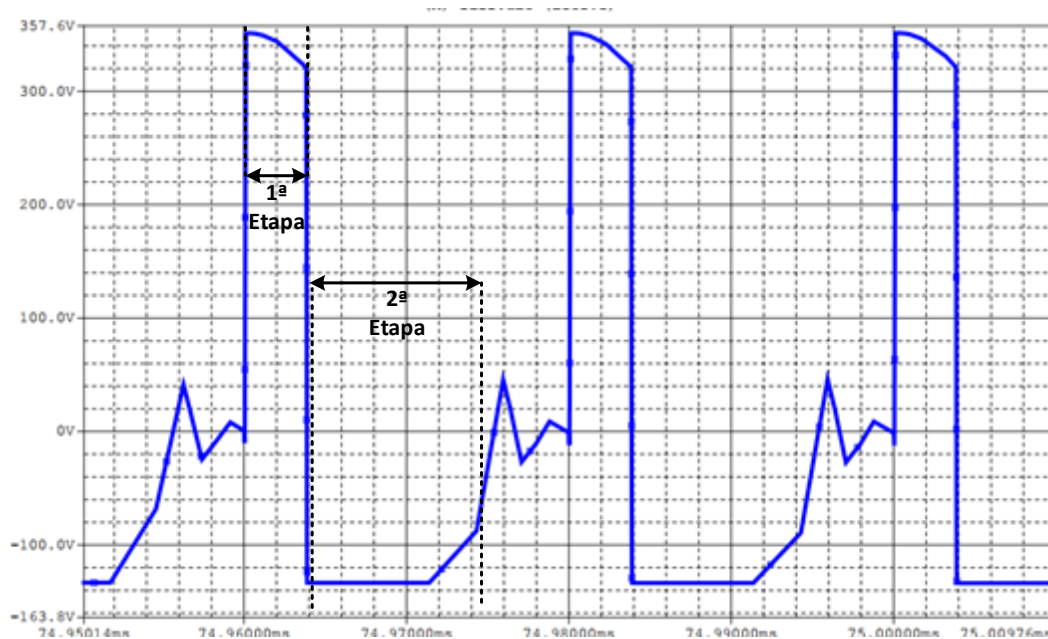


Figura 46. Tensão sobre o Indutor  $L_o$  do conversor SEPIC MCD.

A Figura 47 é a tensão sobre o interruptor, a tensão máxima é de 470 V ao fim da primeira etapa de condução é de 380 V ao fim da segunda etapa de condução.

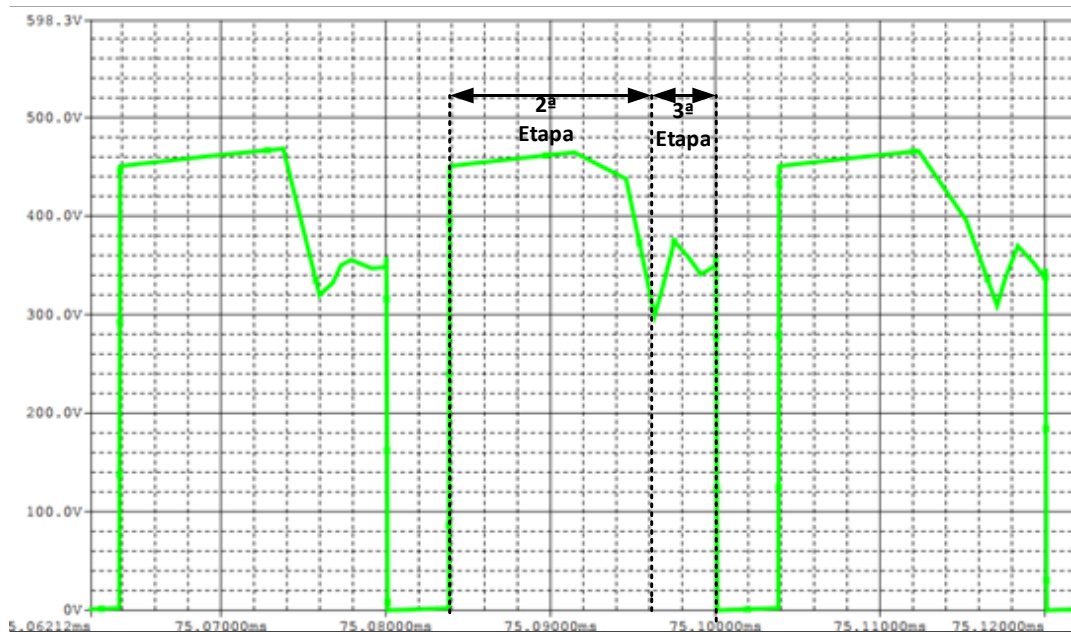


Figura 47. Tensão Sobre o Interruptor do conversor SEPIC MCD.

A Figura 48 é a tensão sobre o diodo. O valor mínimo é de -180 V na primeira etapa de condução e de -485 V da terceira etapa de condução.

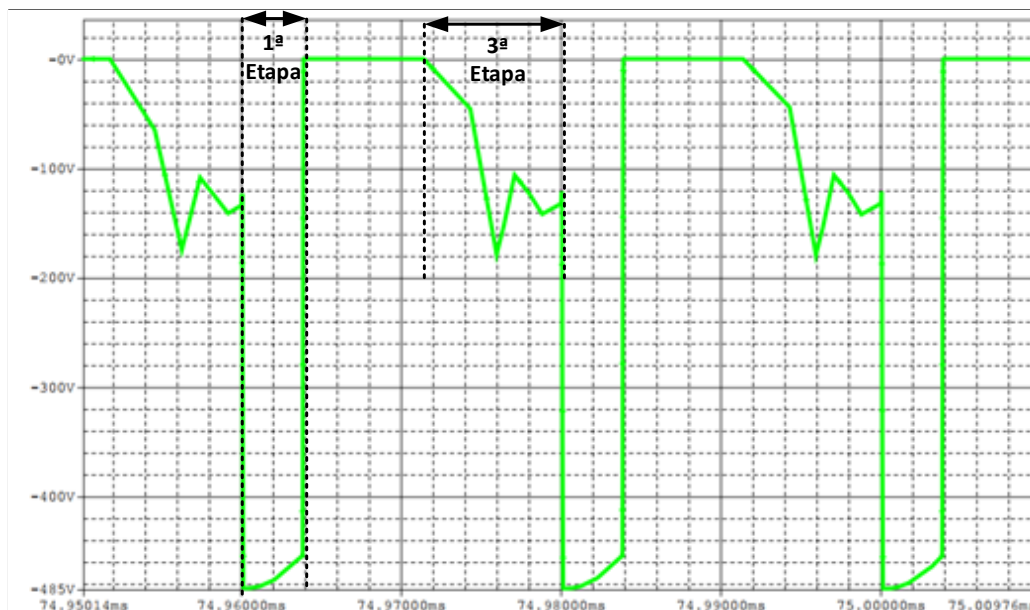


Figura 48. Tensão sobre o Diodo do conversor SEPIC MCD.



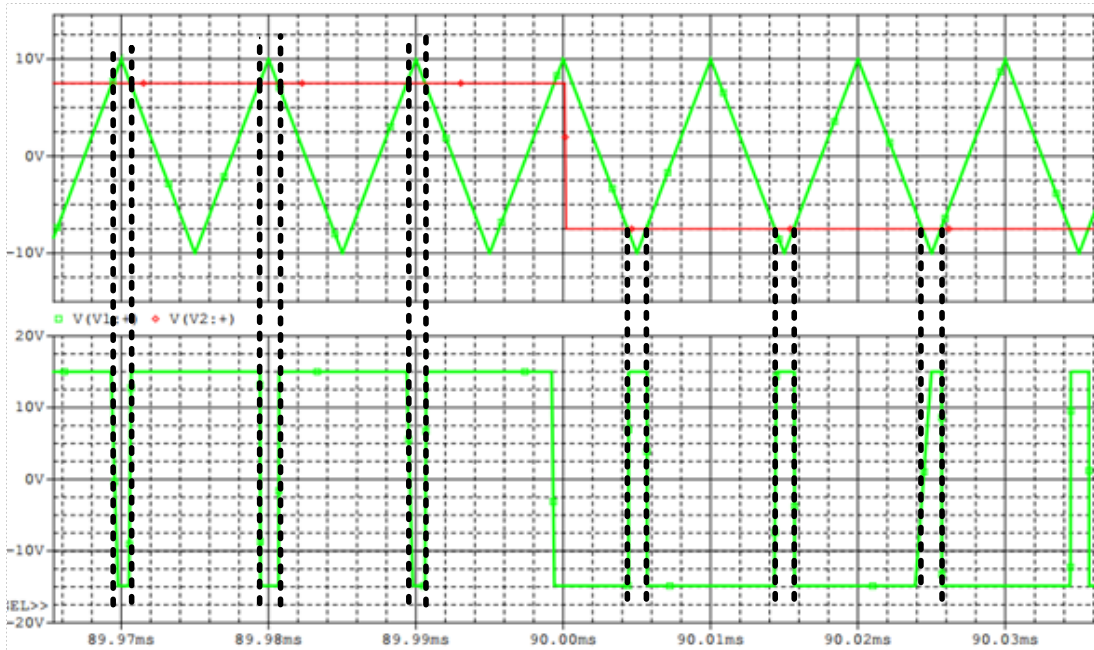


Figura 50. Geração dos Pulsos de comando do Inversor Halfbridge.

A Figura 51 é a representação dos sinais PWM, da modulação I-LFSQW, de comando nos interruptores do inversor de meia ponte. No instante observado é quando a referência passa da parte negativa para a positiva. Também é possível observa que os sinais são complementares.

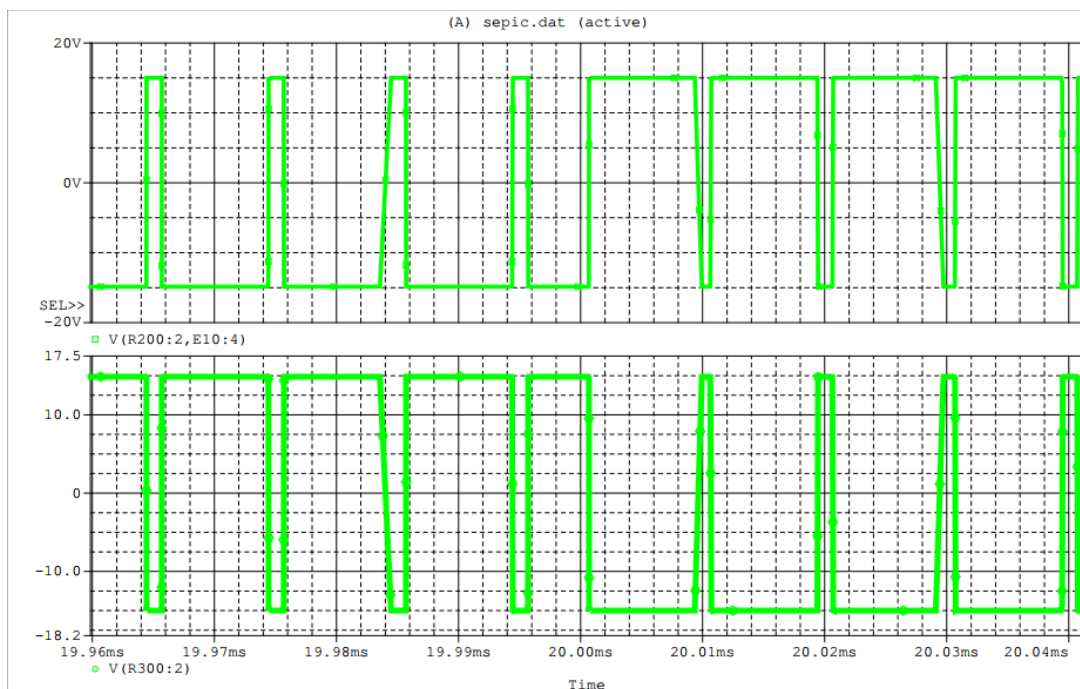


Figura 51. Sinal de Comando Inversor.

#### 4.2.1 Topologia Integrada carga RL

A carga RL utilizado na simulação é uma indutância de 10 mH e uma resistência de 317,5  $\Omega$ . A resistência substitui os LEDs CA nesta simulação.

A Figura 52 é a representação da tensão de entrada de 230 V eficaz na frequência de 50 Hz e a correspondente corrente de entrada em fase com a tensão, com valor eficaz de corrente de 370 mA.

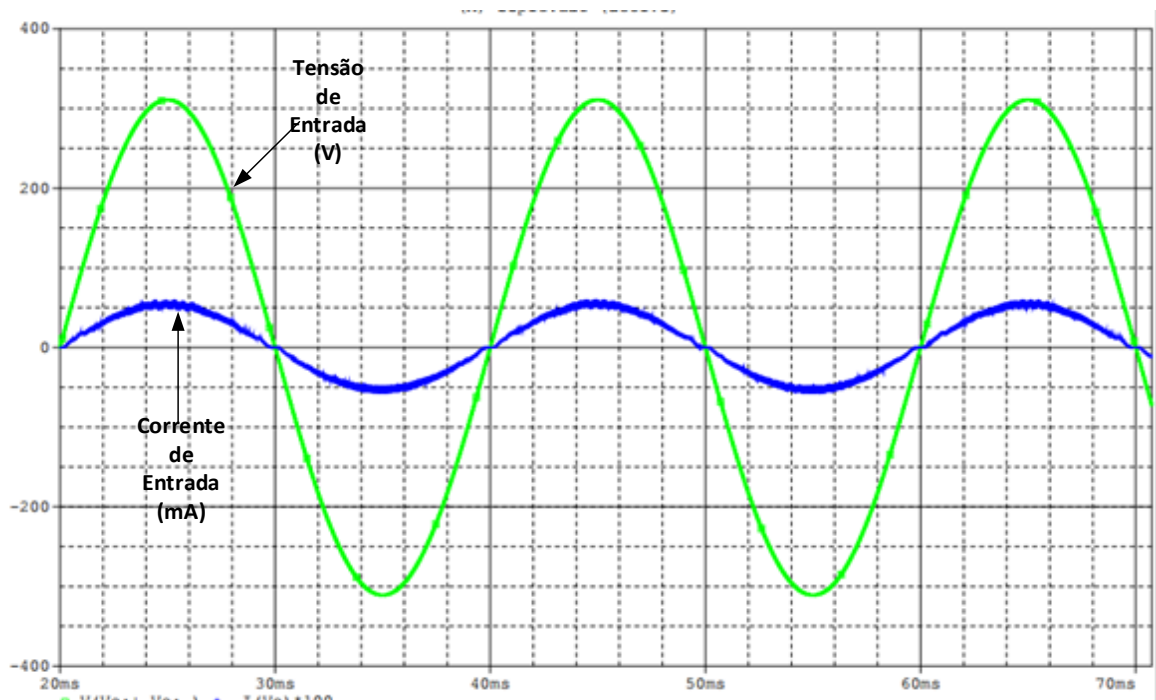


Figura 52. Tensão e Corrente de Entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 53. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL. é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_i$ . A sua amplitude é de cerca de 530 mA e a corrente eficaz medida é de 370 mA, seu valor médio de corrente é de 325 mA.

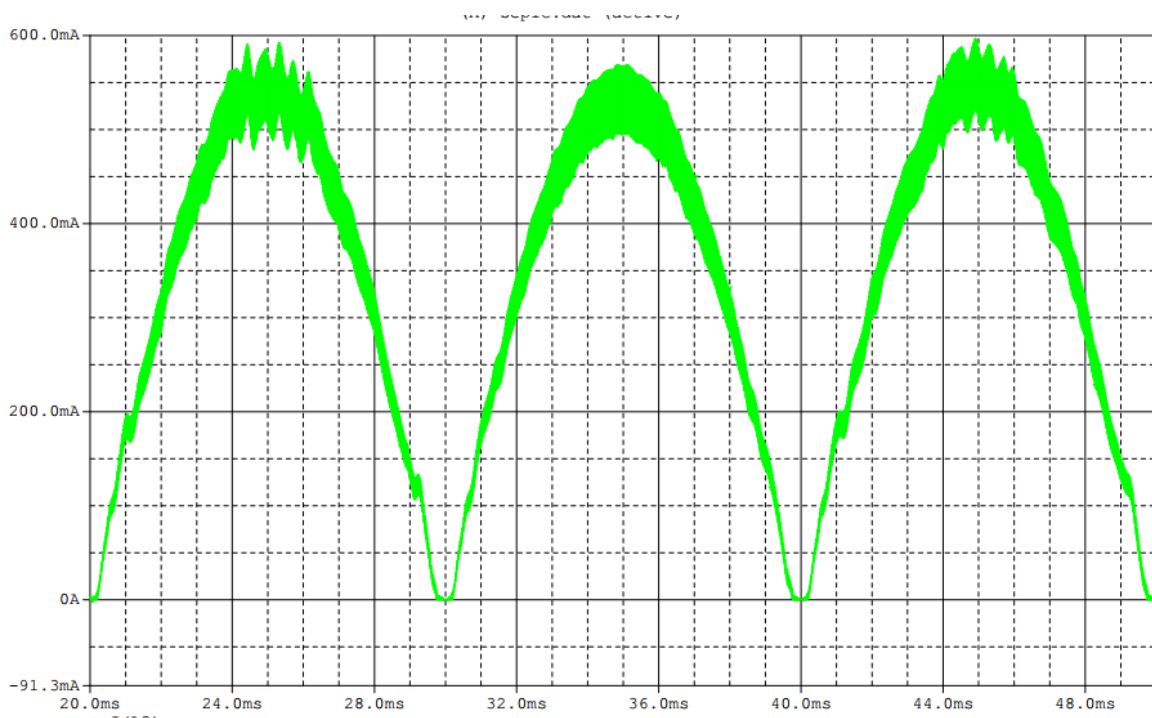


Figura 53. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 54 é a resposta da simulação do indutor  $L_i$  em alta frequência, cujos resultados são compatíveis com os apresentados na Figura 11. O seu valor mínimo é de 495 mA e o seu valor máximo é de 567 mA. Estes valores foram obtidos no intervalo quando a corrente é máxima.

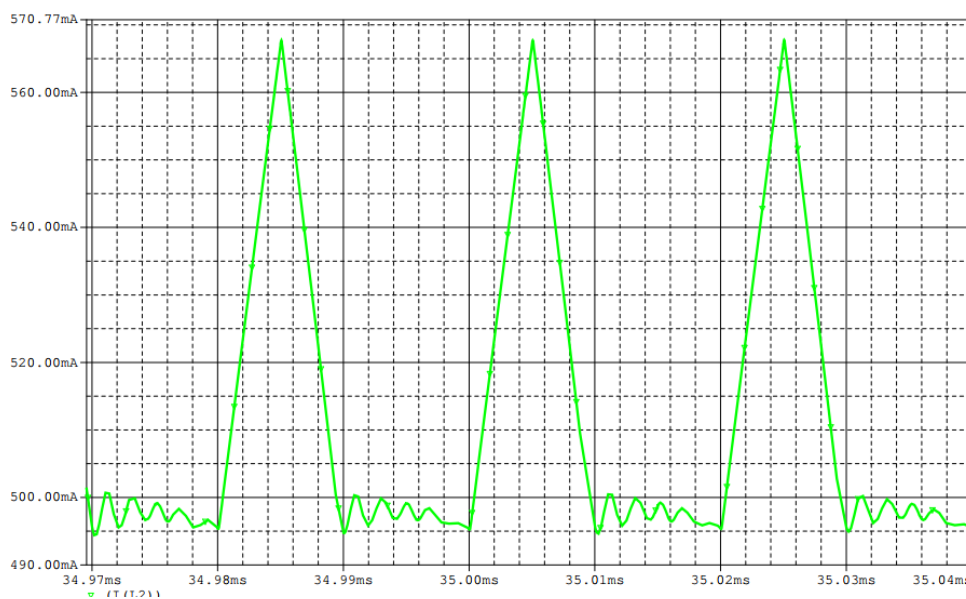


Figura 54. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 55 é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_o$ . Seu valor eficaz é de 940 mA, seu valor médio de corrente é de 215 mA.

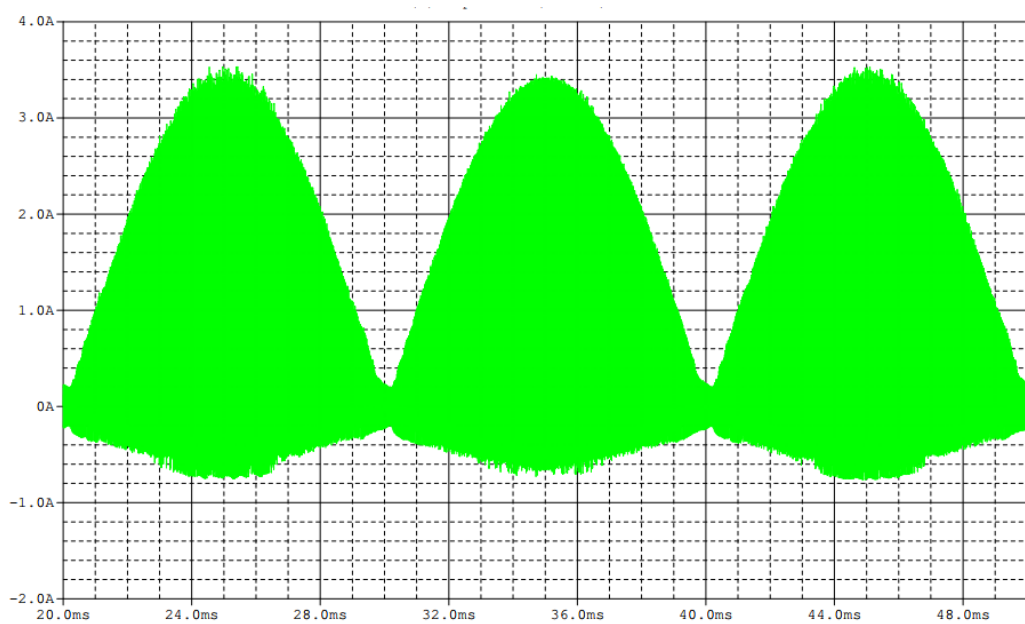


Figura 55. Corrente que percorre o indutor  $L_o$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 56 é a simulação das correntes dos indutor  $L_o$  em alta frequência. Seu valor mínimo é de -600 mA e o máximo é de aproximadamente 3,4 A.



Figura 56. Corrente que percorre o indutor  $L_o$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 57 é a simulação da corrente semicondutores, Mosfet (em verde) e do Díodo (em vermelho). O valor máximo da corrente dos semicondutores é de 4 A, a corrente eficaz do diódo é de 700 mA e a corrente eficaz do interruptor é de 840 mA. O valor médio de corrente no interruptor é 325 mA e o valor médio de corrente é 225 mA.

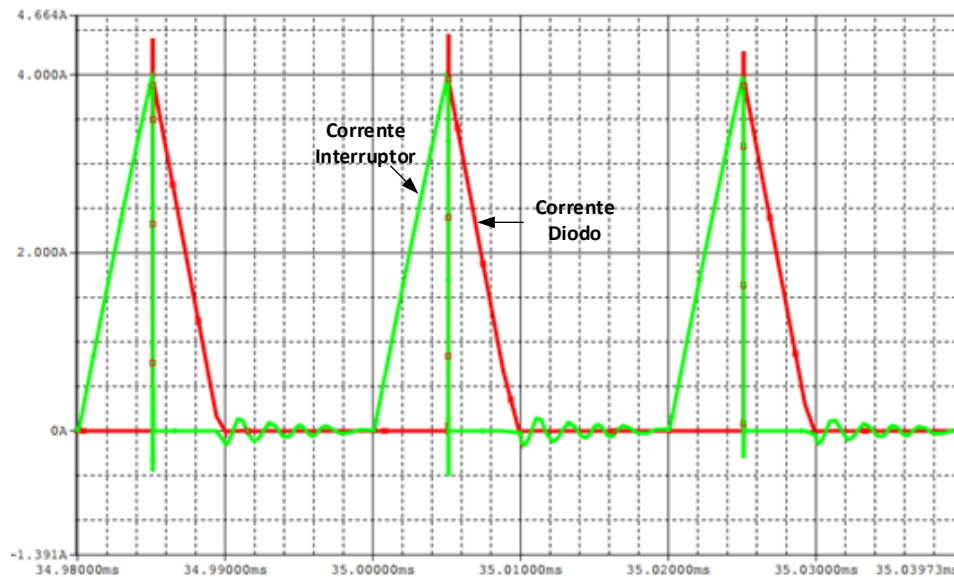


Figura 57. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 58 é a resposta de simulação para a corrente que percorre o condensador  $C_i$ . O seu valor máximo é de cerca de 360 mA e o seu valor mínimo é de cerca de -2,95 A.



Figura 58. Corrente no Condensador  $C_i$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 59 é a simulação da tensão e corrente de saída. O valor médio da tensão é de 127 V e a ondulação de tensão é de 10 V, o valor médio da corrente é de 400 mA do conversor SEPIC em MCD.

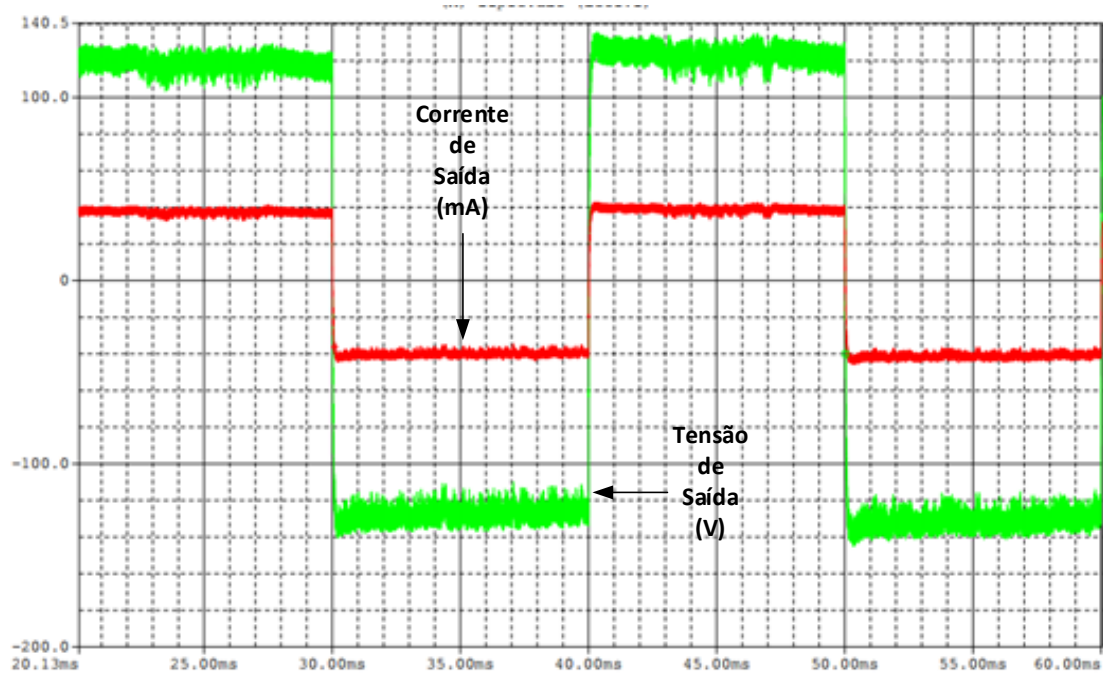


Figura 59. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Tabela 16 são os valores obtidos em simulação das correntes dos principais componentes do conversor SEPIC.

**Tabela 16. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.**

Variável	Sigla	Corrente (A) para a tensão de entrada de 230 V
Corrente mínima indutor Li	$IL_{i_{min}}$	0,46
Corrente média indutor Li	$IL_{i_{med}}$	0,325
Corrente máxima indutor Li	$IL_{i_{max}}$	0,57
Corrente eficaz indutor Li	$IL_{i_{ef}}$	0,37
Corrente mínima indutor Lo	$IL_{o_{min}}$	-0,600
Corrente média indutor Lo	$IL_{o_{med}}$	0,215
Corrente máxima indutor Lo	$IL_{o_{max}}$	3,4
Corrente eficaz indutor Lo	$IL_{o_{ef}}$	0,25
Corrente média Interruptor	$IS_{ef}$	0,325
Corrente eficaz Interruptor	$IS_{med}$	0,46
Corrente média Diodo	$ID_{ef}$	0,325
Corrente eficaz Diodo	$ID_{med}$	0,57

A Figura 60 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_i$ . O seu valor máximo é de 340 V e o mínimo de  $-340$  V.

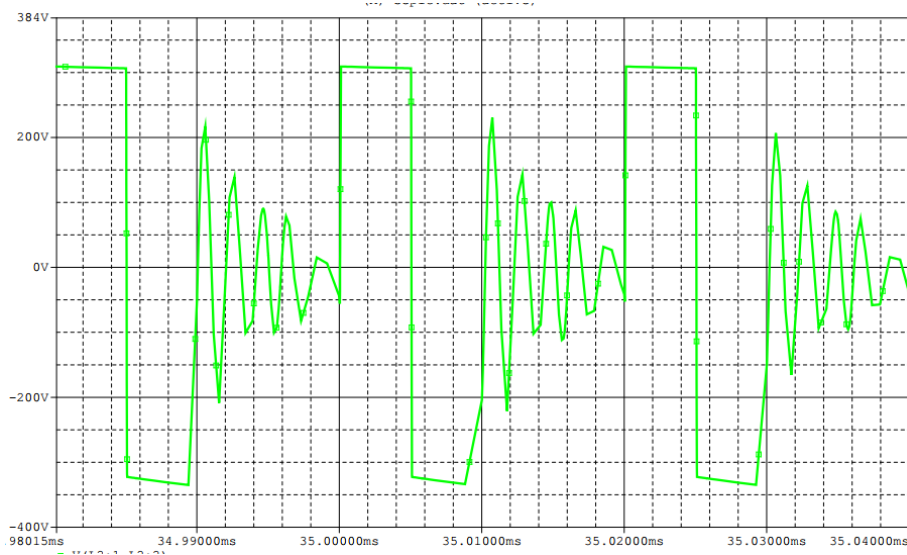


Figura 60. Tensão sobre o Indutor  $L_i$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 61 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_o$ . O seu valor máximo é de 350 V e o mínimo de  $-325$  V.

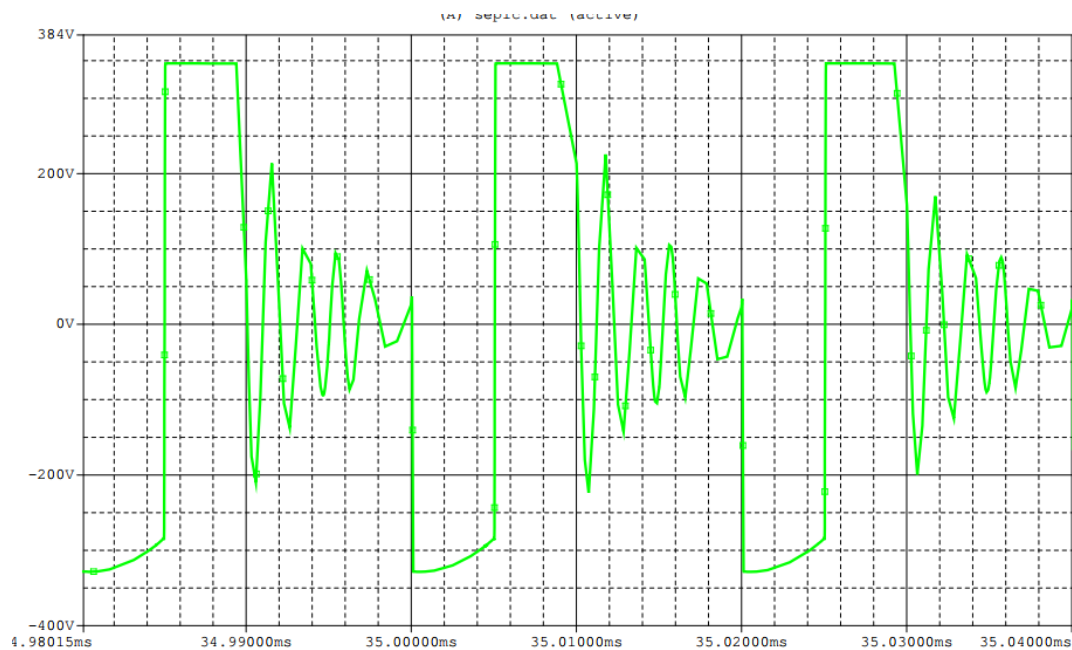


Figura 61. Tensão sobre o Indutor  $L_o$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 62 é a tensão sobre o interruptor, a tensão máxima cerca de 650 V ao fim da primeira etapa de condução é de 380 V ao fim da segunda etapa de condução.

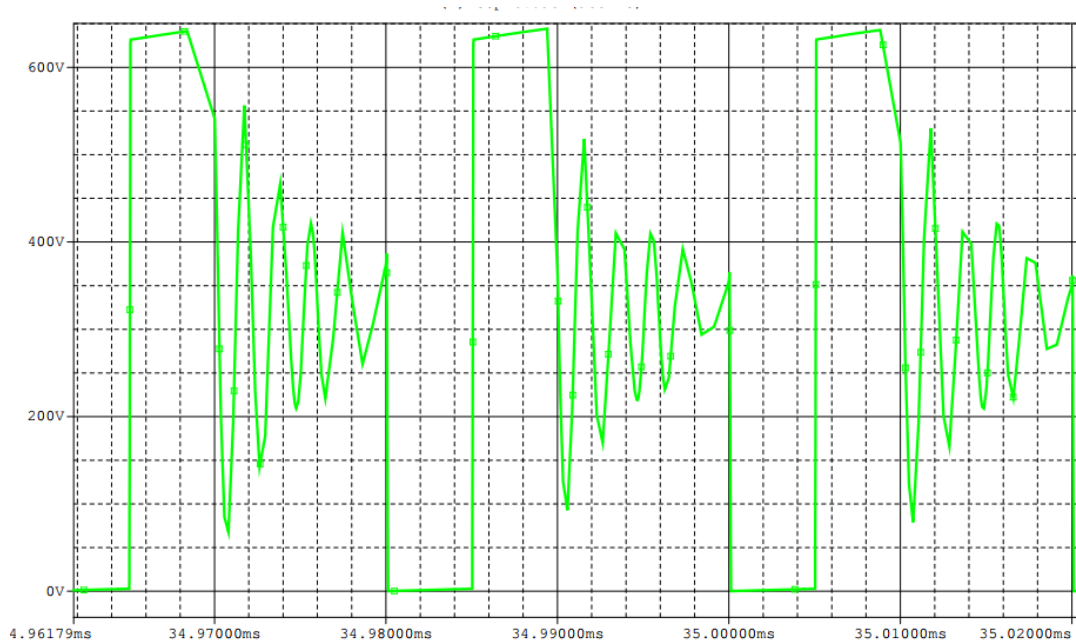


Figura 62. Tensão sobre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 63 é a tensão sobre o diodo. O valor máximo é de 675 V.

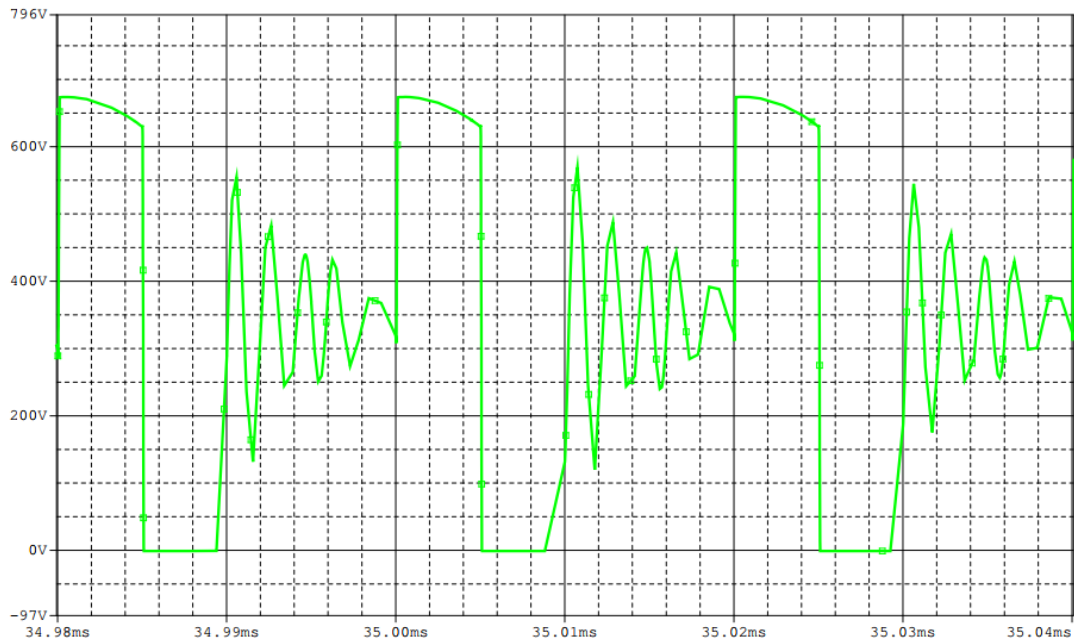


Figura 63. Tensão sobre o diodo do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

#### 4.2.2 SEPIC + halfbridge carga LEDs

A carga de LEDs de corrente alternada é representada na Figura 64.

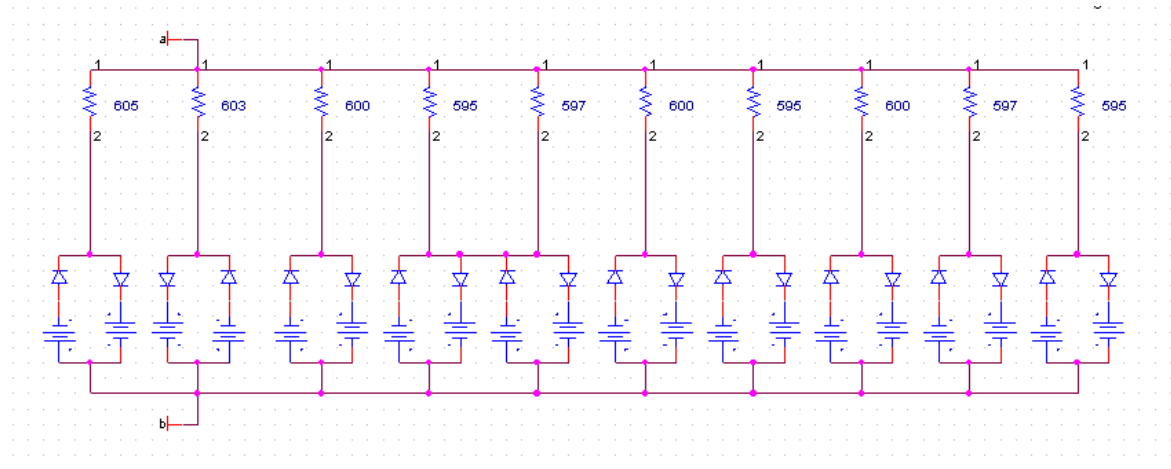


Figura 64. LED's de Corrente alternada.

A Figura 65 é a representação da tensão de entrada de 230 V eficaz na frequência de 50 Hz e a correspondente corrente de entrada em fase com a tensão, com valor eficaz de corrente de 460 mA.

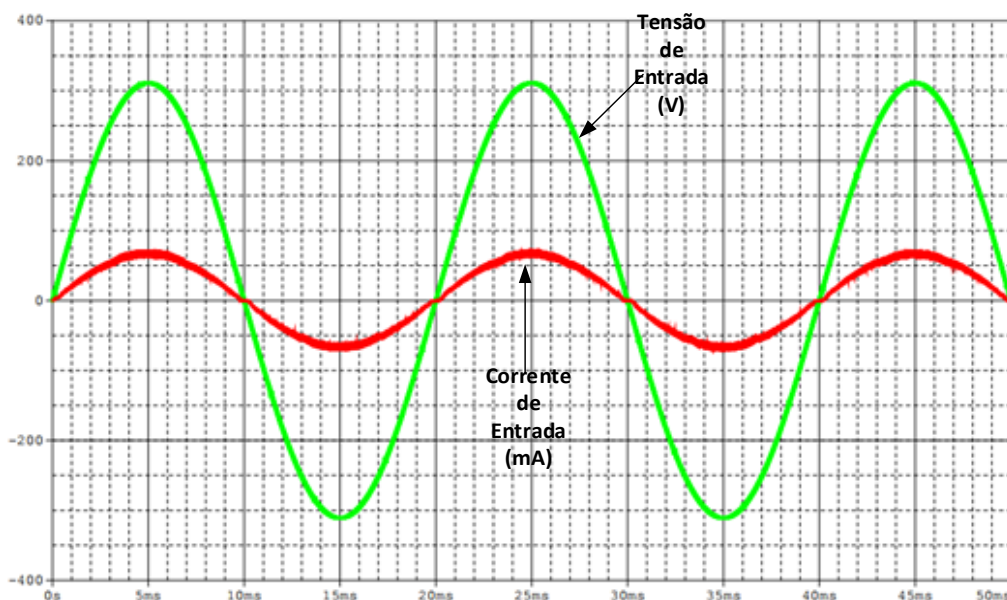


Figura 65. Tensão e Corrente de Entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 66 é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_i$ . A sua amplitude é de cerca de 495 mA e a corrente eficaz é de 310 mA e a tensão média 410 mA.

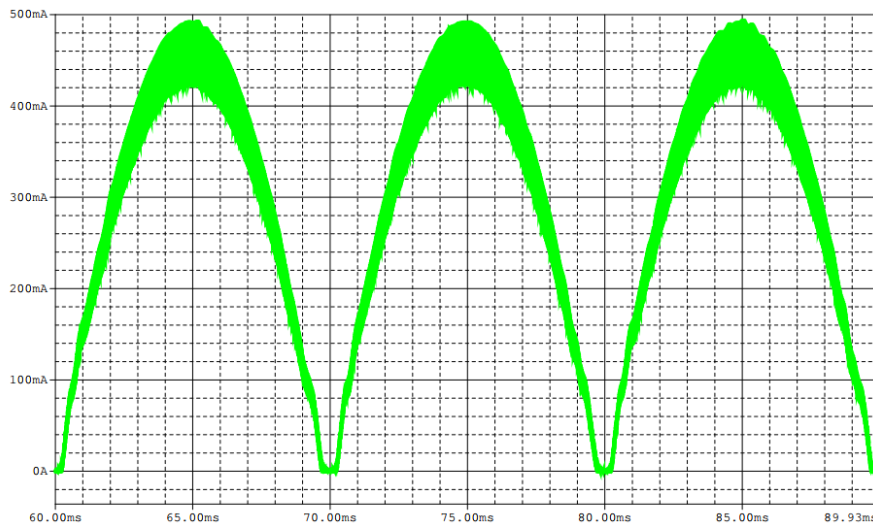


Figura 66. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 67 é a resposta da simulação do indutor  $L_i$  em alta frequência, cujos resultados são compatíveis com os apresentados na Figura 11. O seu valor mínimo é de 425 mA e o seu valor máximo é de 495 mA. Estes valores foram obtidos no intervalo quando a corrente é máxima.

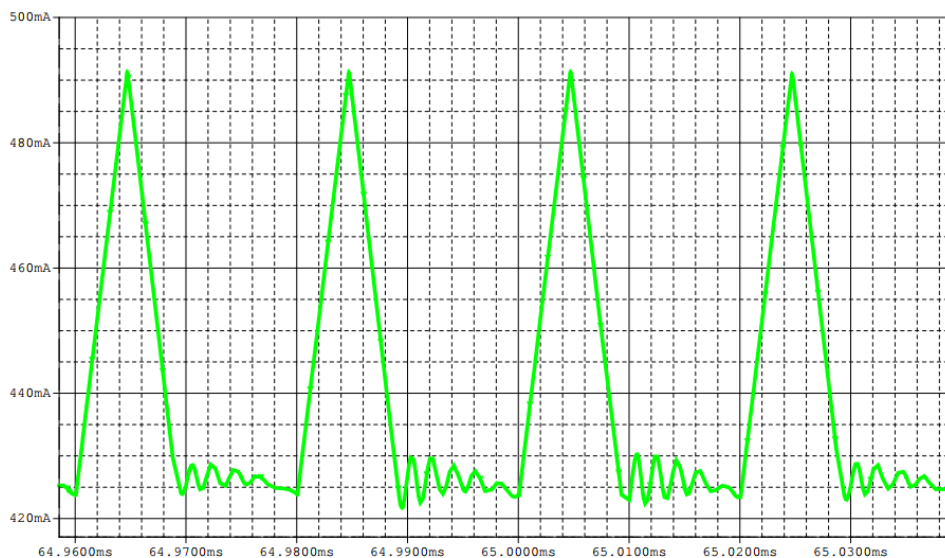


Figura 67. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 68 é a forma de onda de corrente em baixa frequência simulada do indutor  $L_o$ . Seu valor eficaz de corrente é de 850 mA e o valor médio de corrente é de 275 mA.

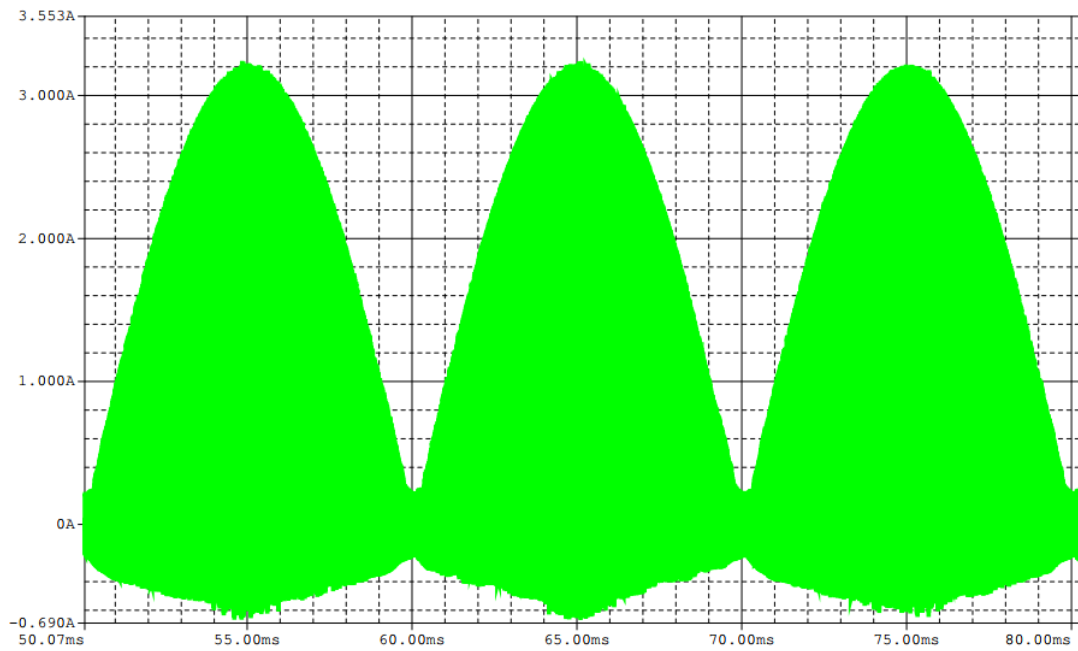


Figura 68. Corrente que percorre o indutor  $L_o$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 69 é a simulação das correntes dos indutor  $L_o$  em alta frequência. Seu valor mínimo é de -600 mA e o máximo é de aproximadamente 3,2 A.

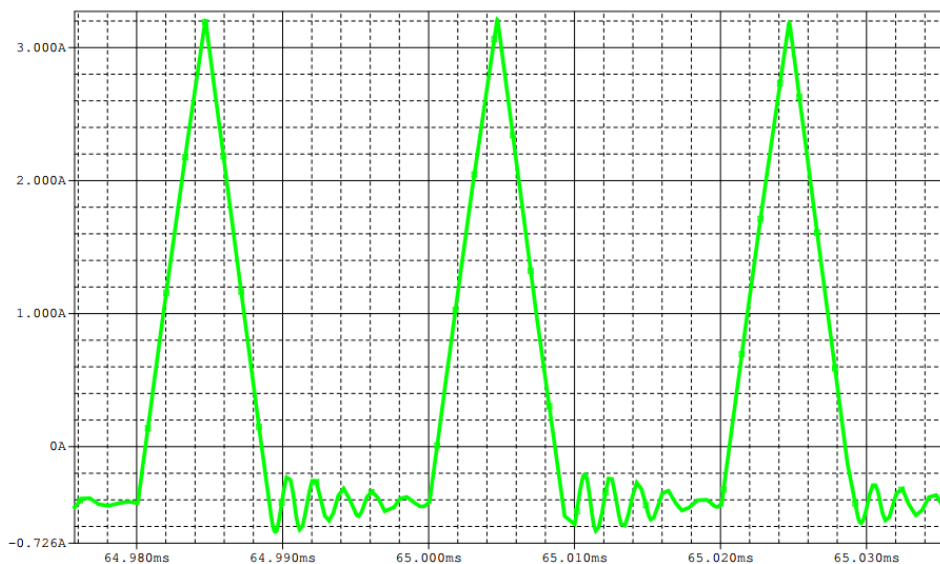


Figura 69. Corrente que percorre o indutor  $L_o$  em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 70 é a simulação da corrente semicondutores, Interruptor (em verde) e do Díodo (em vermelho). O valor máximo da corrente dos semicondutores é de 3,6 A, a corrente eficaz do díodo é de 650 mA seu valor médio de corrente é 200 mA, a corrente eficaz do interruptor é de 750 mA e seu valor médio é de 280 mA.

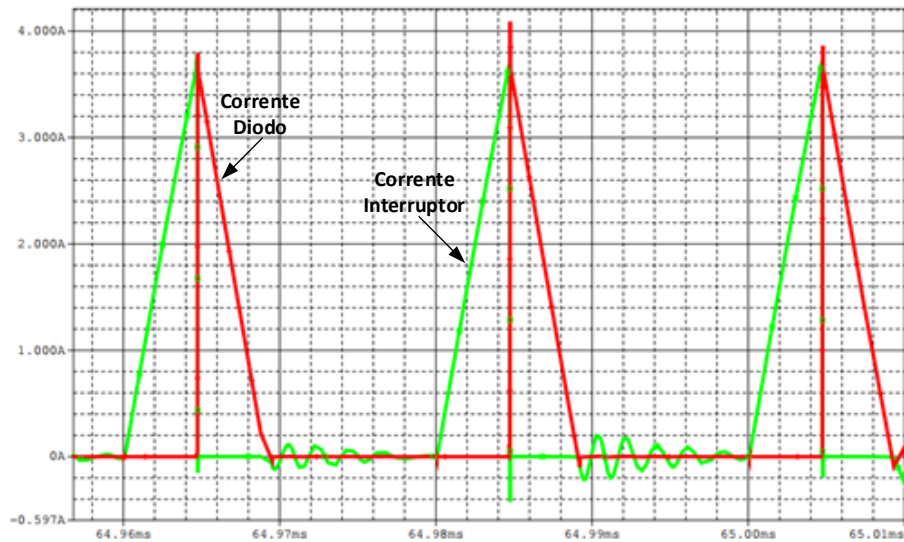


Figura 70. Corrente no Mosfet e Corrente no Díodo em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 71 é a resposta de simulação para a corrente que percorre o condensador  $C_i$ . O seu valor máximo é de cerca de 700 mA e o seu valor mínimo é de cerca de -3,8 A.

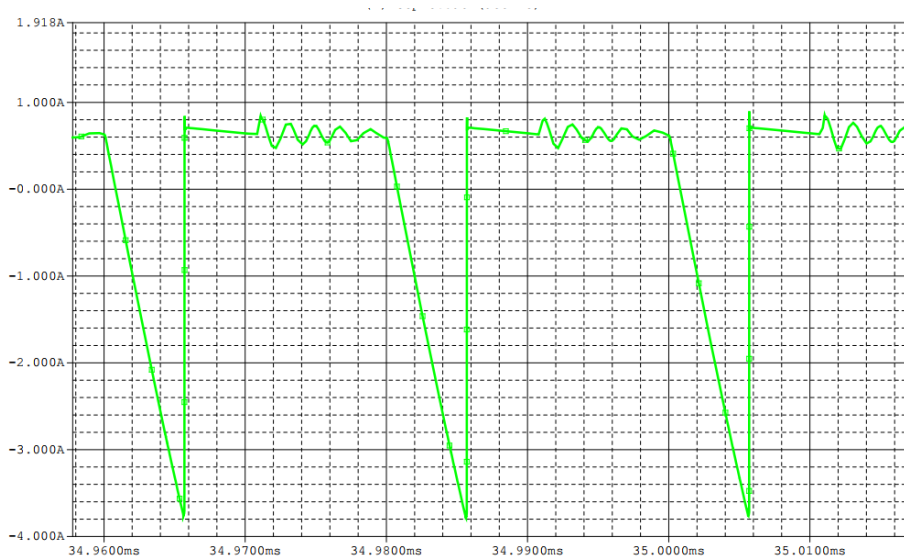


Figura 71. Corrente no Condensador  $C_i$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 72 é a simulação da tensão e corrente de saída. O valor eficaz da tensão é de 127 V, o valor eficaz da corrente é de 400 mA da topologia integrada.

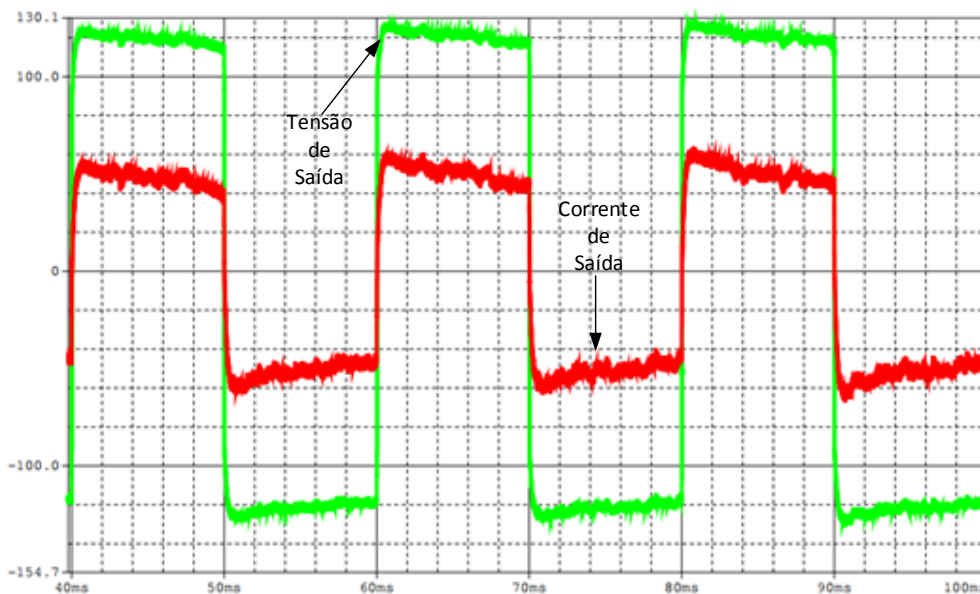


Figura 72. Tensão e Corrente de saída.

A Tabela 17 são os valores obtidos em simulação das correntes dos principais componentes do conversor SEPIC.

**Tabela 17. Valores de simulação das principais correntes que circulam pelo conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.**

Variável	Sigla	Corrente (A) para a tensão de entrada de 230 V
Corrente mínima indutor $L_i$	$IL_{i_{\min}}$	0,425
Corrente média indutor $L_i$	$IL_{i_{\text{med}}}$	0,28
Corrente máxima indutor $L_i$	$IL_{i_{\max}}$	0,495
Corrente eficaz indutor $L_i$	$IL_{i_{\text{ef}}}$	0,31
Corrente mínima indutor $L_o$	$IL_{o_{\min}}$	-0,6
Corrente média indutor $L_o$	$IL_{o_{\text{med}}}$	0,2
Corrente máxima indutor $L_o$	$IL_{o_{\max}}$	3,2
Corrente eficaz indutor $L_o$	$IL_{o_{\text{ef}}}$	0,85
Corrente média Interruptor	$IS_{\text{ef}}$	0,28
Corrente eficaz Interruptor	$IS_{\text{med}}$	0,75
Corrente média Diodo	$ID_{\text{ef}}$	0,2
Corrente eficaz Diodo	$ID_{\text{med}}$	0,65

A Figura 73 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_i$ . O seu valor máximo é de 310 V e o mínimo de -347 V.

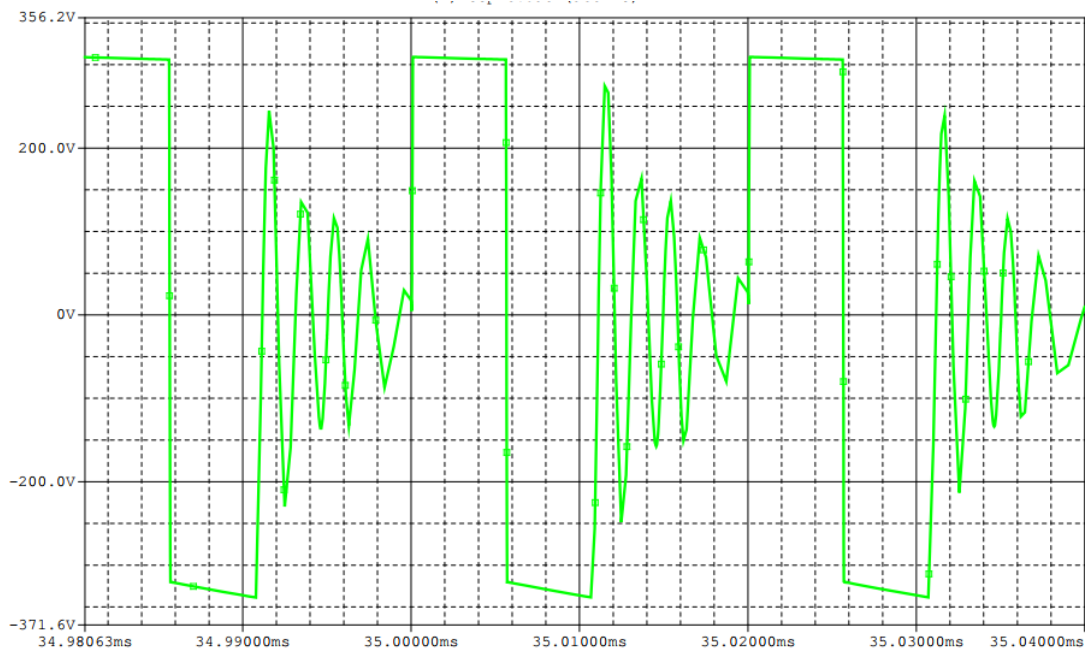


Figura 73. Tensão sobre o indutor  $L_i$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 74 é a forma de onda da tensão do indutor  $L_o$ . O seu valor máximo é de 350 V e o mínimo de  $-325$  V.

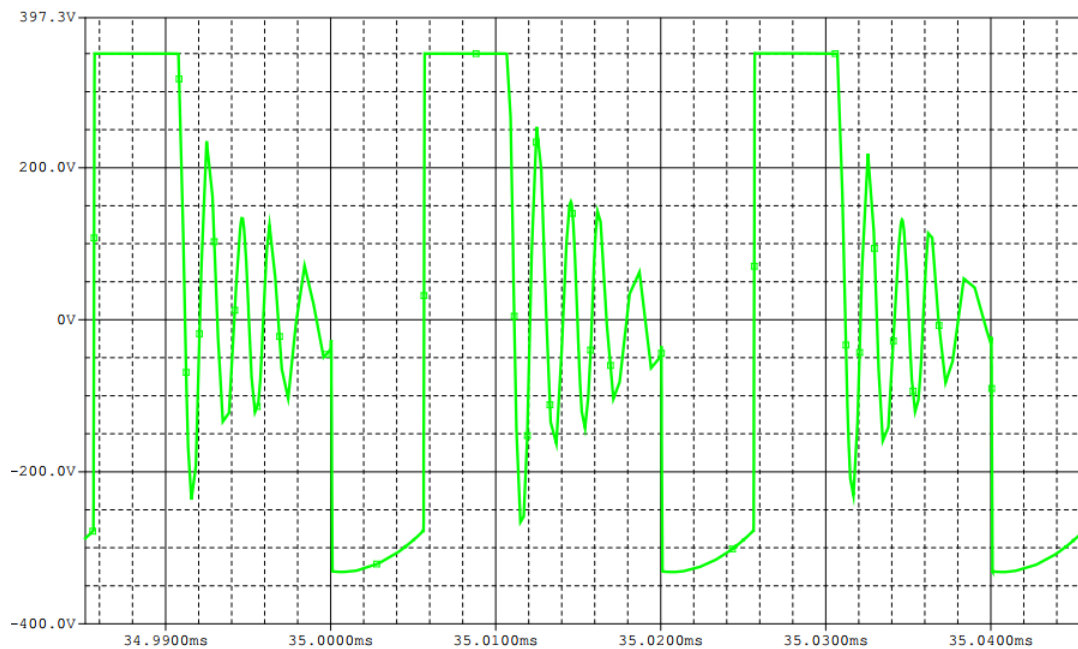


Figura 74. Tensão sobre o indutor  $L_o$  do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 75 é a tensão sobre o interruptor, o valor máximo de tensão é cerca de 650 V.

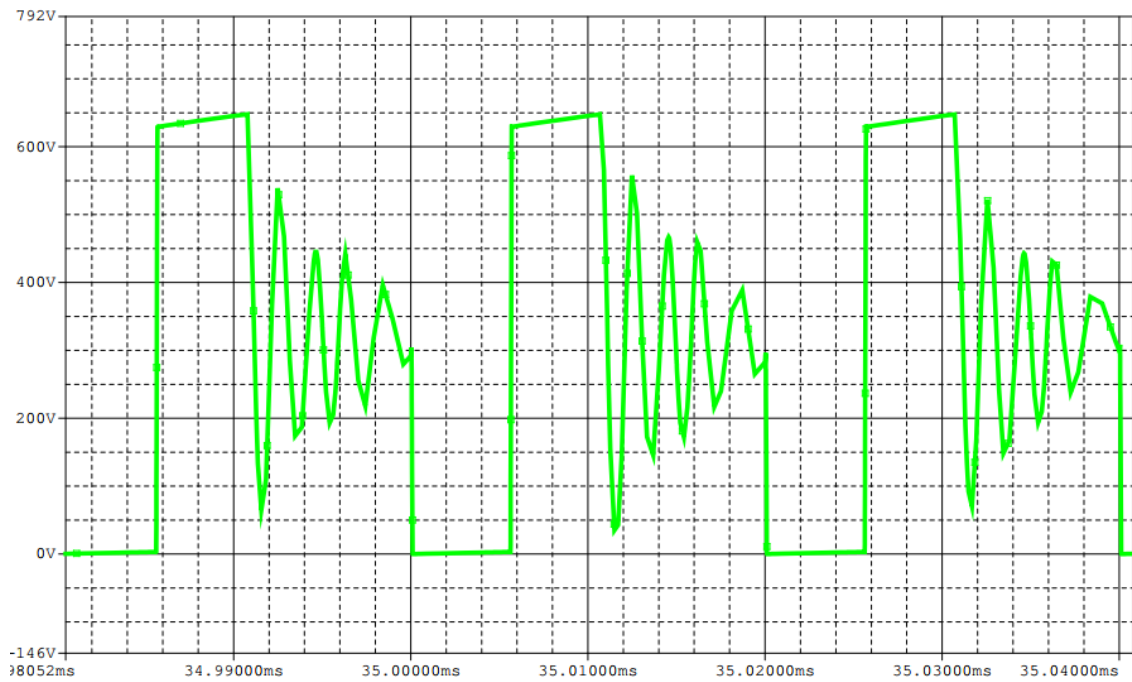


Figura 75. Tensão sobre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

A Figura 76 é a tensão sobre o diodo. O valor mínimo é de - 675 V.

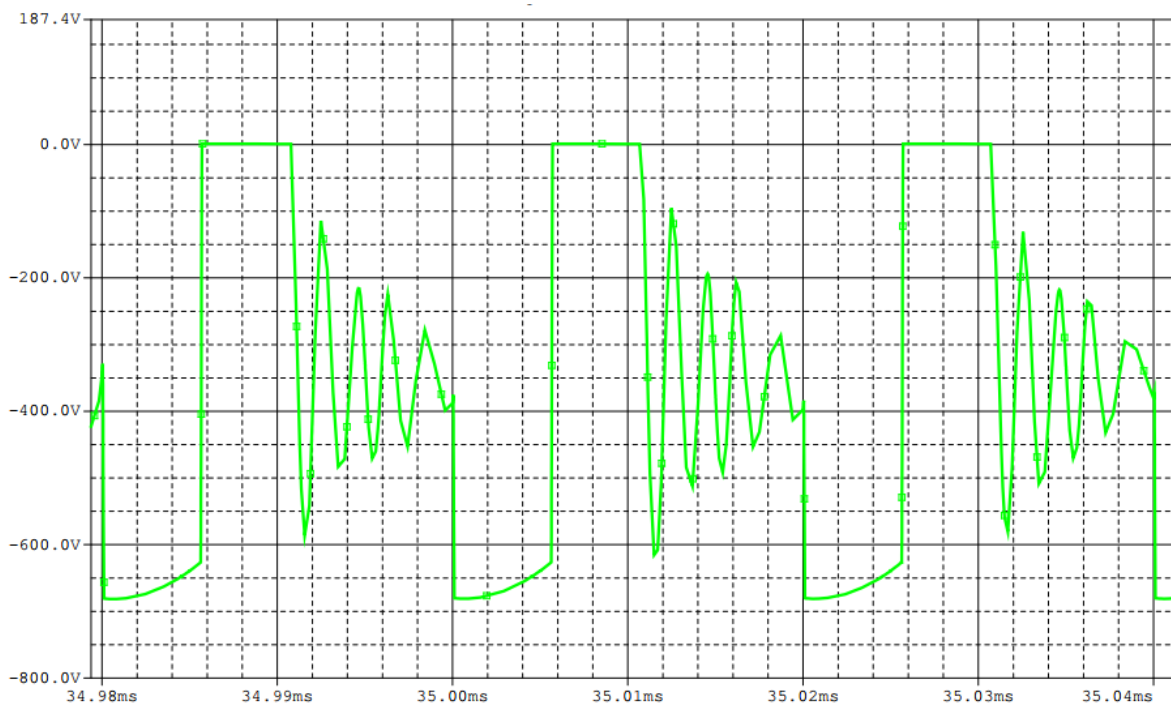


Figura 76. Tensão sobre o diodo do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga LEDs CA.

# 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONVERSOR SEPIC MCD

Nesta seção será demonstrado os resultados para o conversor SEPIC.

## 5.1 Resultados SEPIC em MCD

Primeiramente foi implementado o conversor SEPIC em modo de condução descontínua sem o inversor. A Figura 77 é o *setup* utilizado para o desenvolvimento do conversor. O *setup* é basicamente constituído de uma fonte CC para a alimentação do *driver* do interruptor e um gerador de sinais para gerar o sinal PWM, e um osciloscópio para observar e medir as formas de ondas.

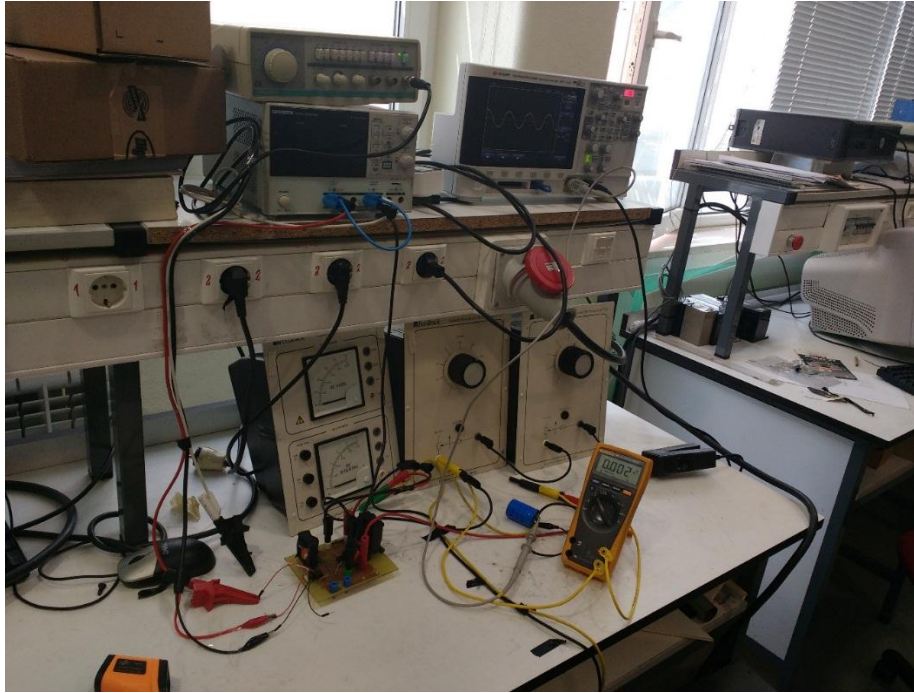


Figura 77. Setup do conversor SEPIC em MCD.

Para as medições do fator de potencia foi uma ponta para a medição dos harmônicos da rede. O valor do fator de potência é dado pela Figura 78, o valor medido é unitário.

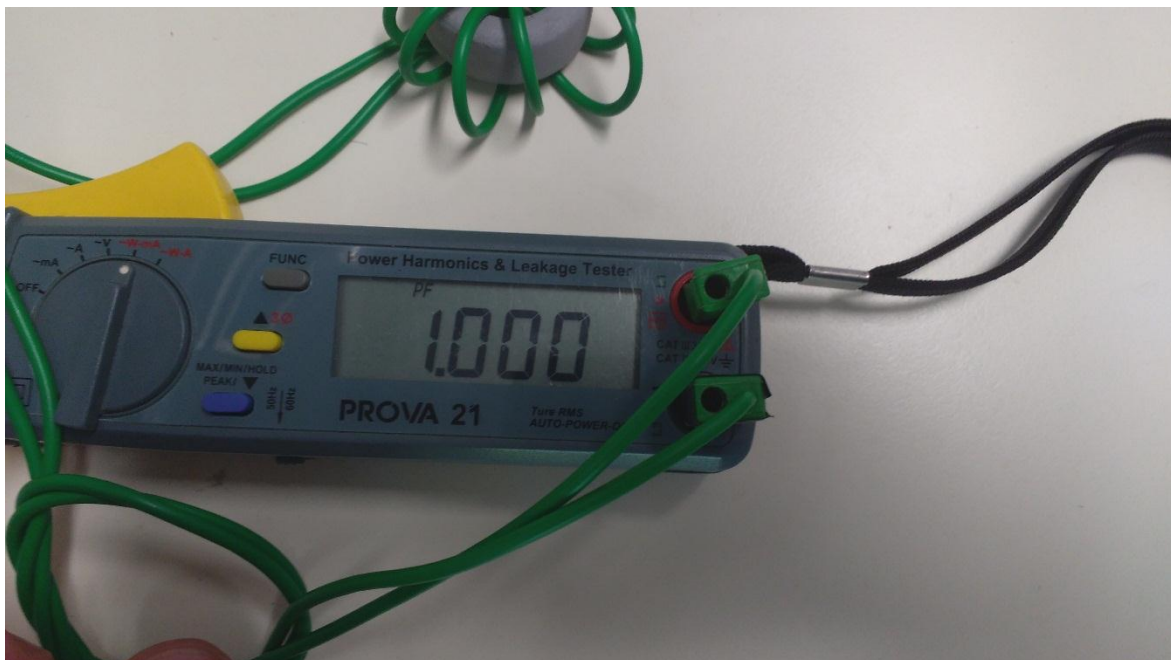


Figura 78. Fator de Potência do conversor SEPIC em MCD.

O valor da potencia ativa é dada pala Figura 79 , o seu valor medido foi de 56,46 W.

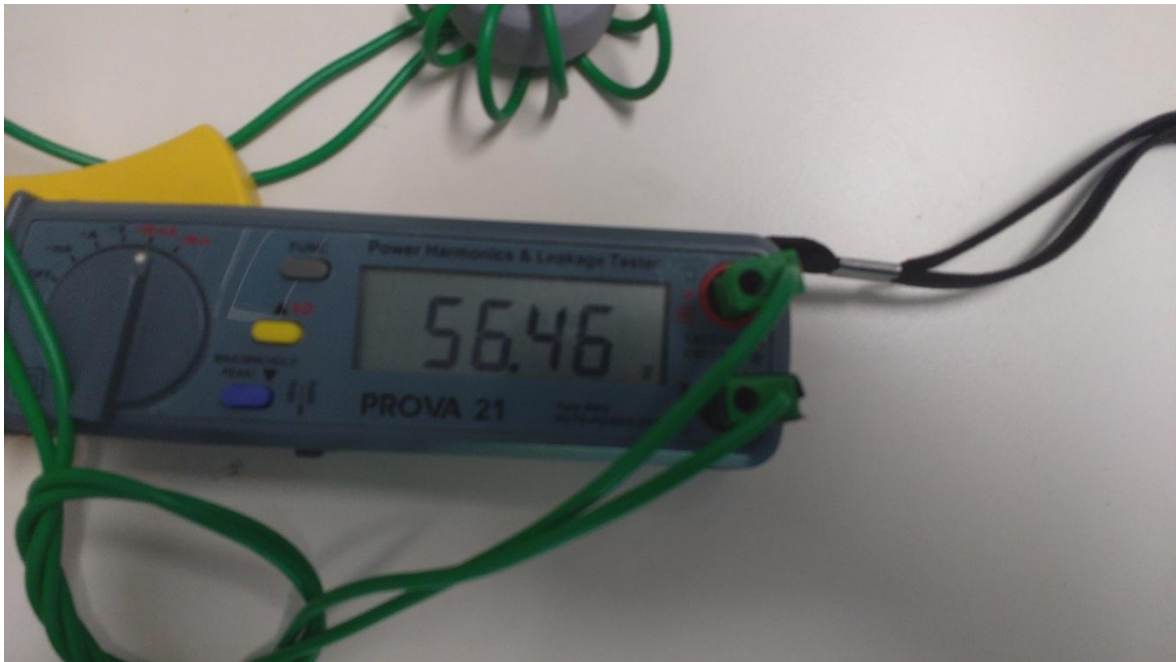


Figura 79. Potência Ativa do conversor SEPIC em MCD.

O valor da potência aparente é dado pela Figura 80, o seu valor medido foi de 56,37 VA.



Figura 80. Potência Aparente do conversor SEPIC em MCD.

Devido ao fato do valor de potência ser unitário, o valor da potência reativa é 0 VA, como é demonstrado na Figura 81.

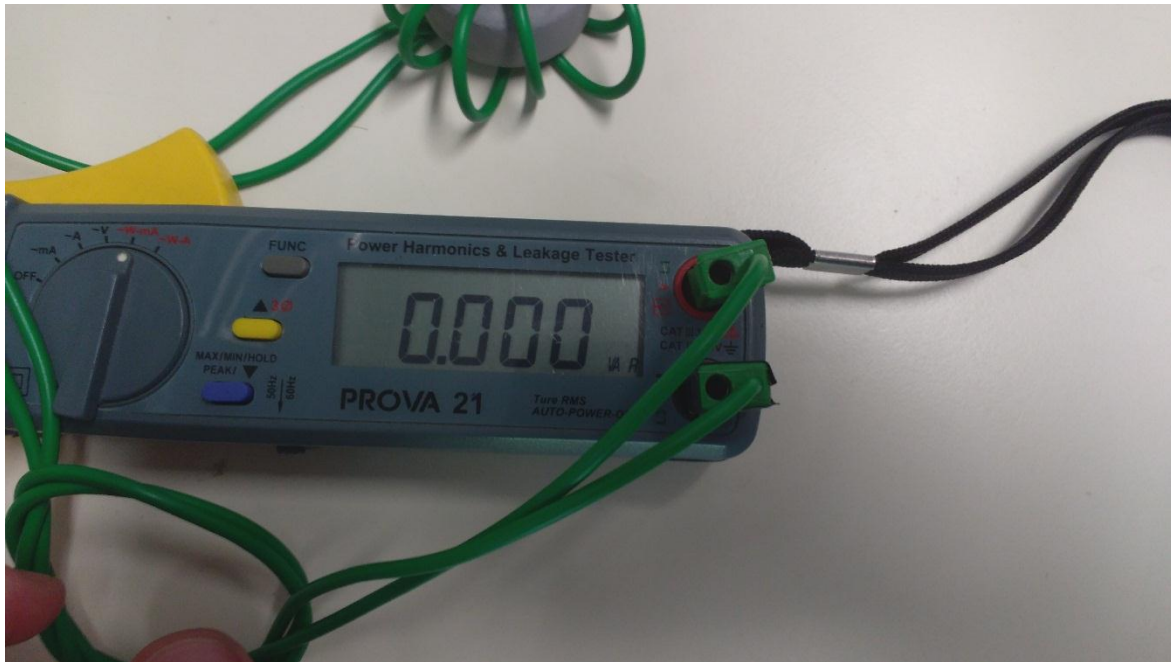


Figura 81. Potência Reativa do conversor SEPIC em MCD.

Tendo o valor de potência unitário a corrente deve estar em fase com a tensão, fato que é comprovado pela Figura 82 onde é mostrado a forma de onda de tensão de entrada retificada (em amarelo) e de corrente de entrada (em verde). O valor eficaz de tensão é de 230 V e o valor eficaz da corrente é de 282 mA.

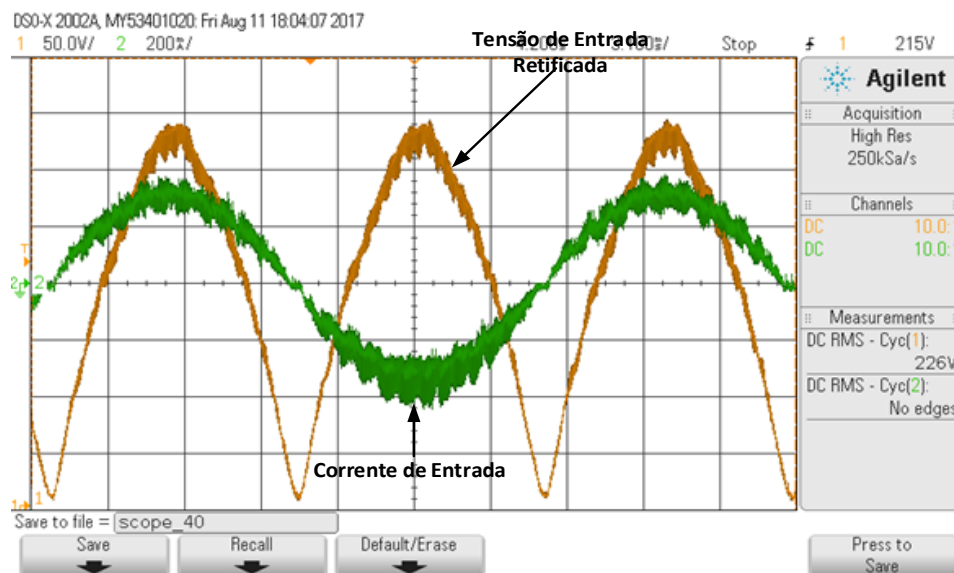


Figura 82. Tensão e corrente de entrada do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 83 mostra a comparação da tensão de entrada senoidal de valor eficaz de 230 V com a tensão de saída de amplitude de 127 V.

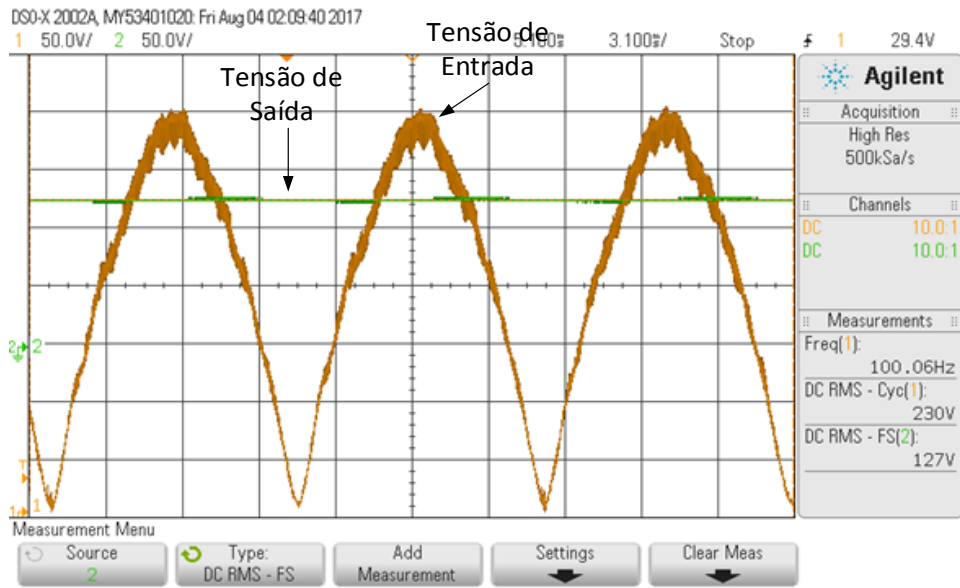


Figura 83. Tensão de entrada x tensão de saída do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 84 é a forma de onda de corrente do indutor de entrada  $L_i$ . O valor da sua amplitude da corrente é de 723 mA e o valor da corrente eficaz é de 275 mA.

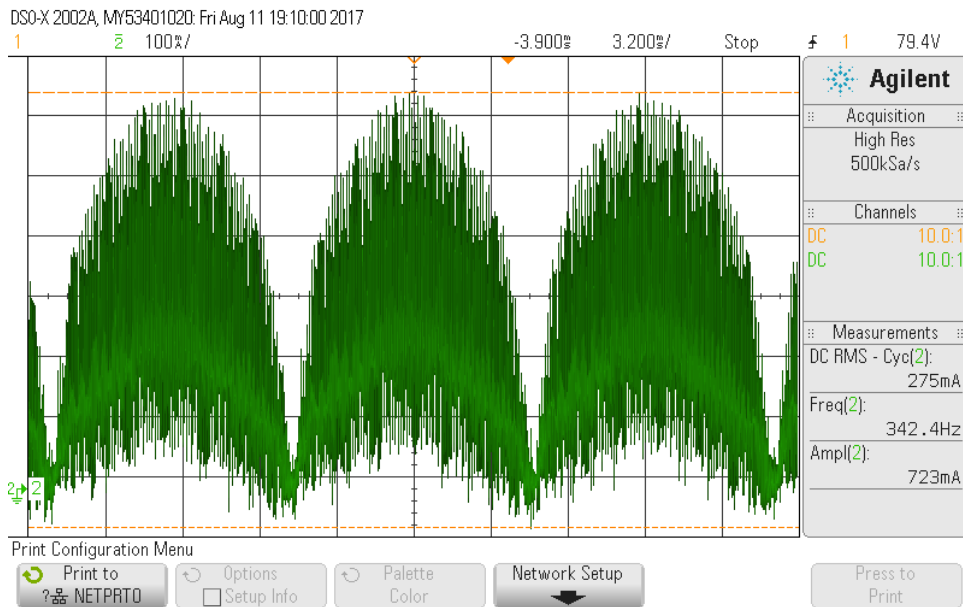


Figura 84. Corrente do indutor  $L_i$  baixa frequência do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 85 é a forma de onda da corrente do indutor de entrada  $L_i$  e alta frequência.

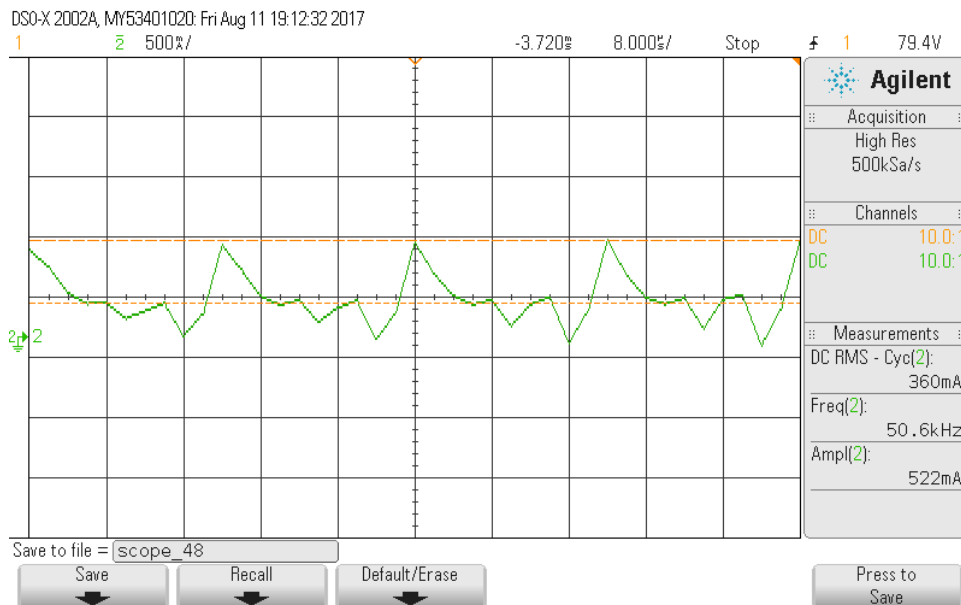


Figura 85. Corrente do indutor  $L_i$  alta frequência do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 86 é a corrente do segundo indutor do conversor SEPIC, o indutor  $L_o$ . O valor da corrente eficaz é de 920 mA.

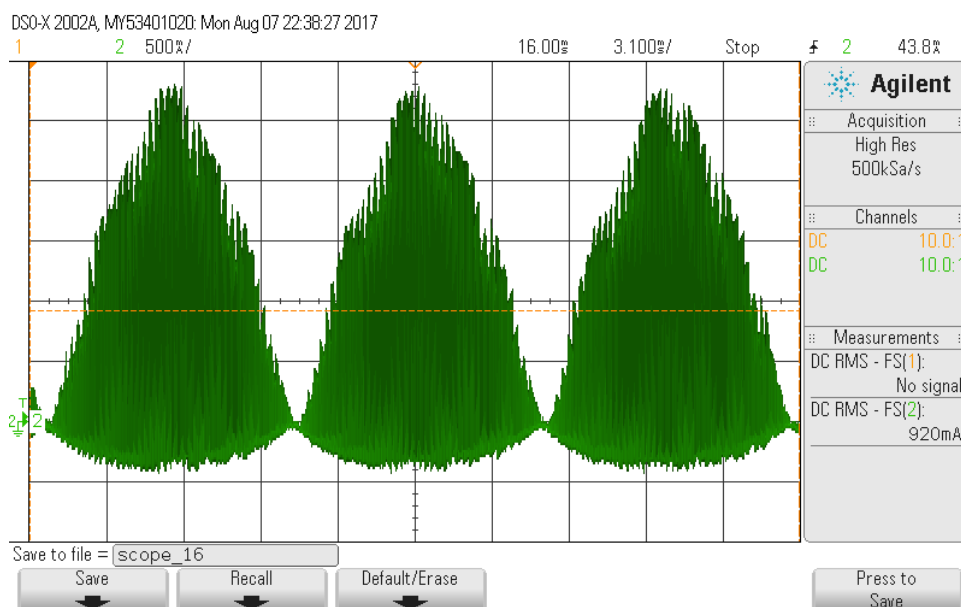


Figura 86. Corrente indutor  $L_o$  baixa frequência do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 87 é a corrente no interruptor, a corrente eficaz é de 690 mA, com picos de 2,35 A.

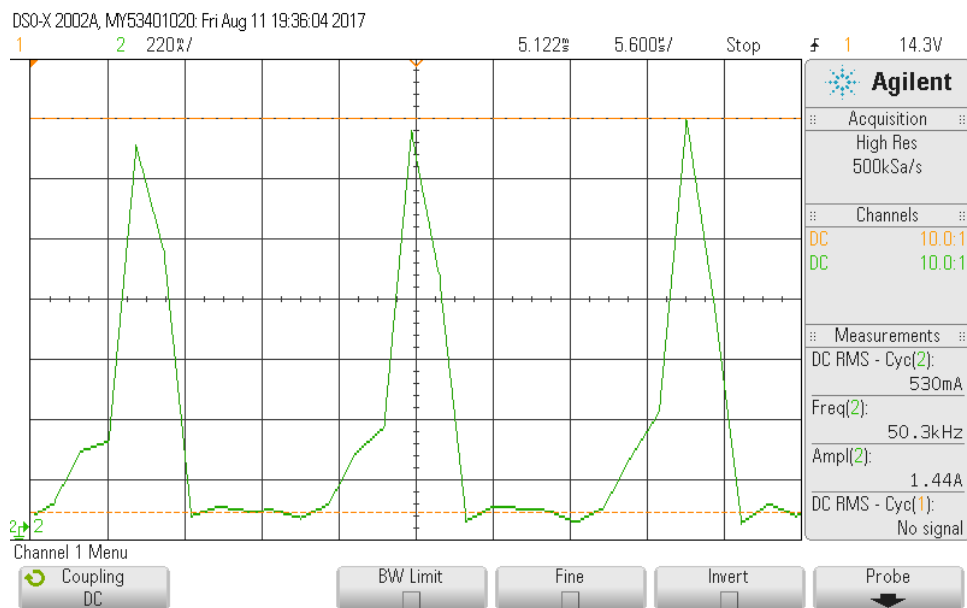


Figura 87. Corrente no Interruptor do conversor SEPIC em MCD.

A Figura 88 é a tensão e corrente de saída do conversor SEPIC, A amplitude da tensão de saída é de 127 V, com uma oscilação de 13 V e a amplitude da corrente de saída é de aproximadamente de 400 mA.

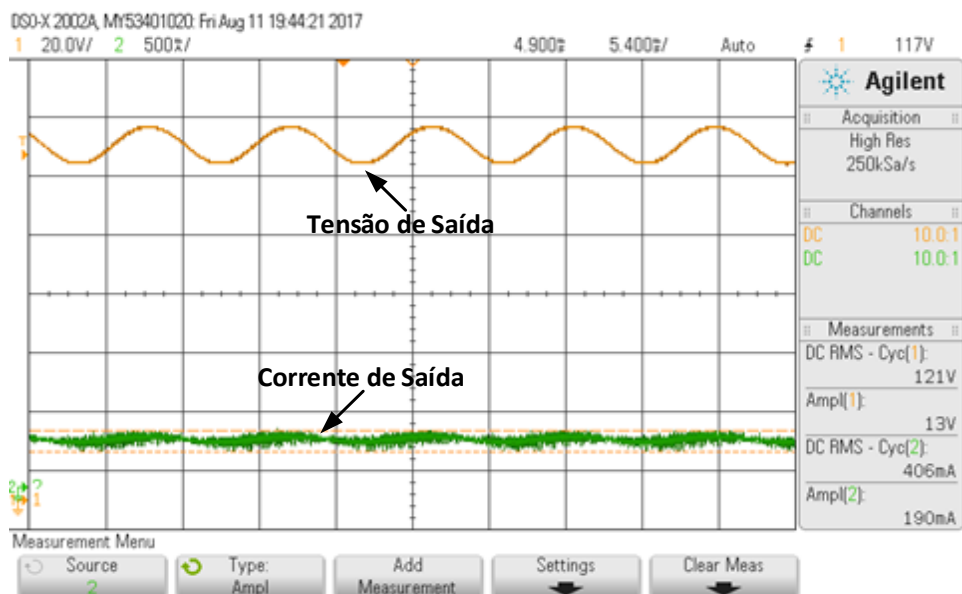


Figura 88. Tensão de saída x Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD.

## 5.2 Resultados topologia integrada Carga RL

Devido ao fato de não possuir cargas de LEDs CA da mesma especificação do conversor, foi utilizada uma carga R de 317,5  $\Omega$  e uma carga L de 10 mH.

A Figura 89 são os pulsos de comando dos dois interruptores do inversor de meia ponte.

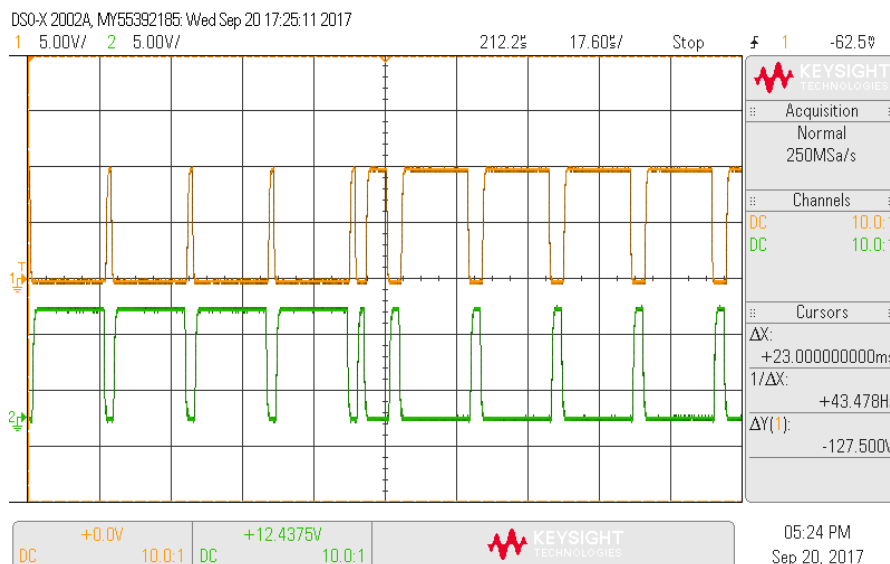


Figura 89. Pulsos de comando interruptores do inversor *halfbridge*.

As medições do fator de potência, potência aparente, potência ativa e potência reativa foram realizadas a tensão de entrada de 150 V eficazes.

A Figura 90 é o valor do fator de potência. Seu valor medido é unitário, ou seja, toda a potência consumida pelo conversor é convertida em alguma forma de trabalho.

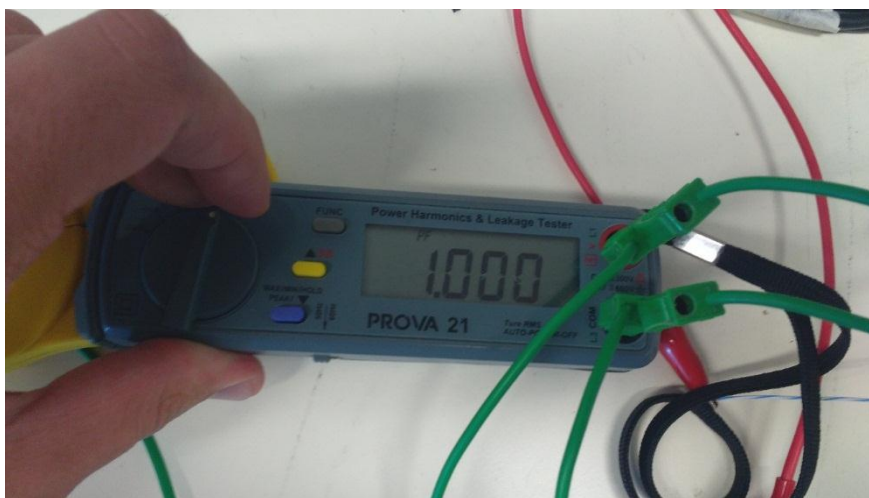


Figura 90. Fator de potência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

Para este nível de tensão, a potência aparente é de 23,3 W. A potência de saída da topologia, neste instante, é de 20,15 W. O rendimento do sistema, é de cerca de 86,5 %.

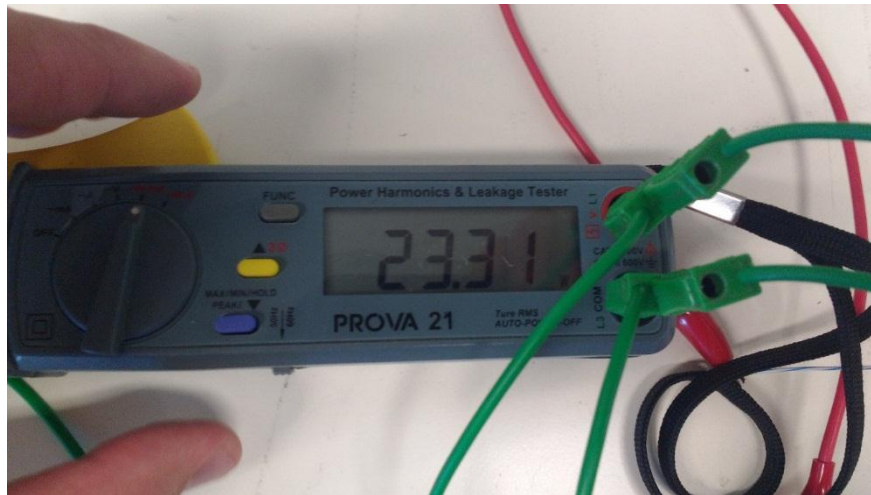


Figura 91. Potência Aparente do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 92 é o valor da potência ativa, o seu valor é de 23,3 VA.

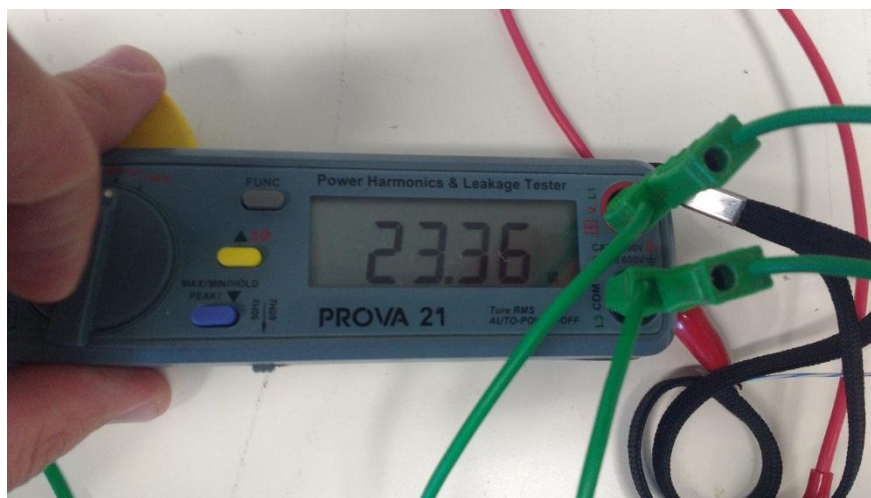


Figura 92. Potência Ativa do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

Como o fator de potência é unitário, o valor da potência reativa é 0 VA R, como é demonstrado na Figura 93.

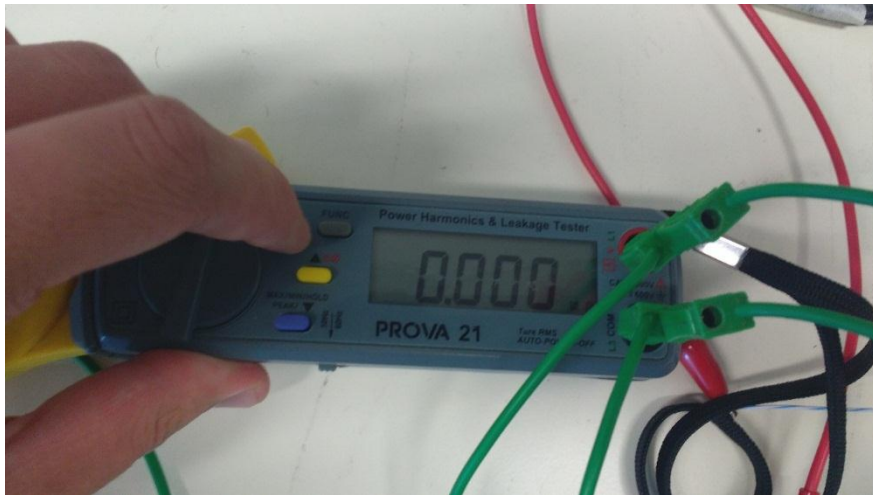


Figura 93. Potência Reativa do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 94 é a tensão de entrada retificada de valor de 190 V eficazes e a corrente de entrada do valor de 253 mA eficazes.

As medições das correntes foram feitas a tensão de 190 V eficazes.

A Figura 94 é a imagem da tensão em fase com a corrente, com o valor eficaz de corrente de 250 mA.

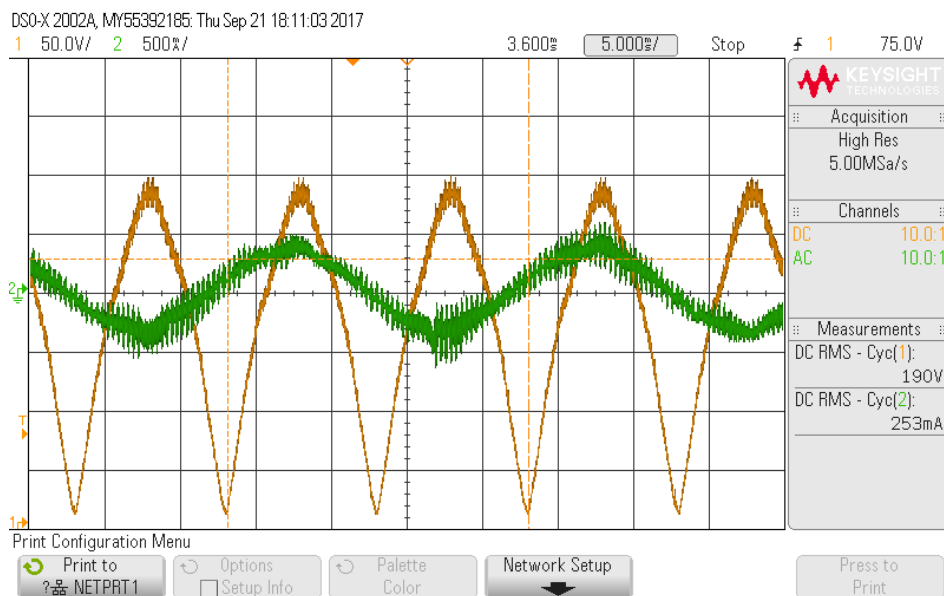


Figura 94. Tensão retificada de entrada e corrente de entrada do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 95 é a representação da corrente que percorre o indutor  $L_o$ . Sua amplitude é de 850 mA.

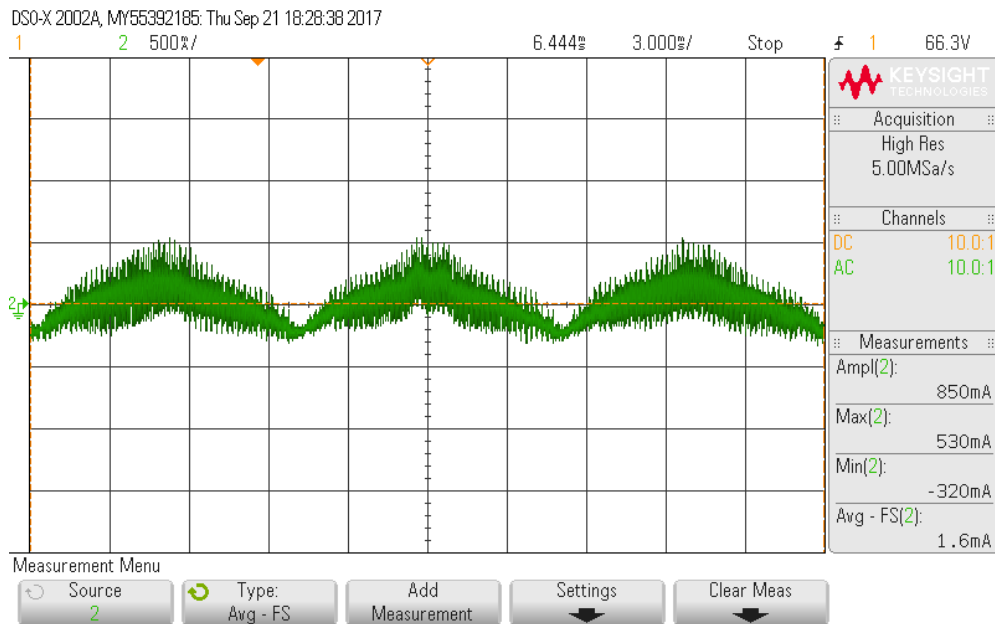


Figura 95. Corre que percorre o indutor  $L_i$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 96 é a corrente que percorre o indutor  $L_o$  em alta frequência. No ponto de maior amplitude, o seu valor máximo é de corrente é de 1.4 A e o valor mínimo é de  $-830$  mA.

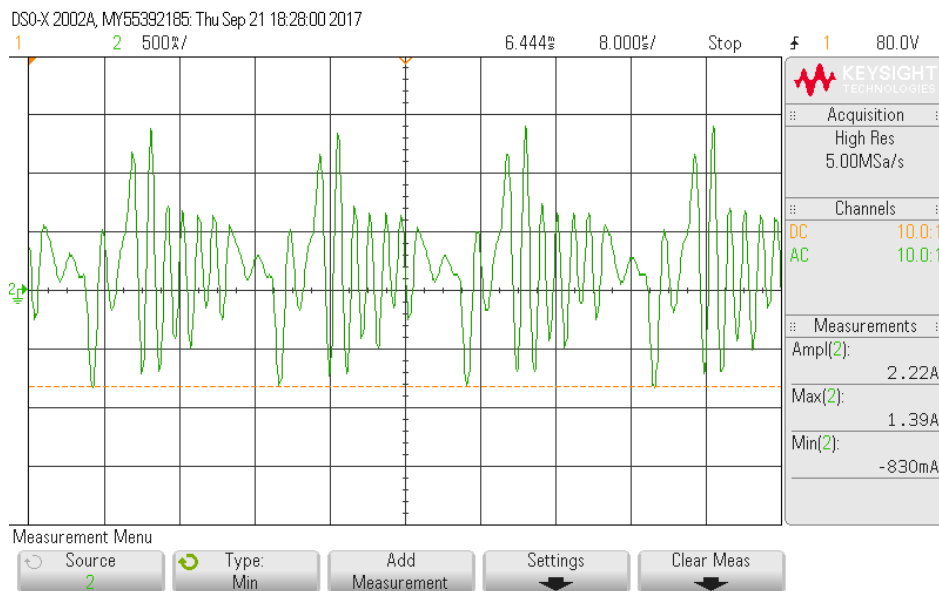


Figura 96. Corrente que percorre o indutor  $L_i$  em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 97 é a corrente do indutor  $L_i$  em baixa frequência, sua amplitude máxima é de 3 A e o seu valor eficaz de corrente é de 620 mA.

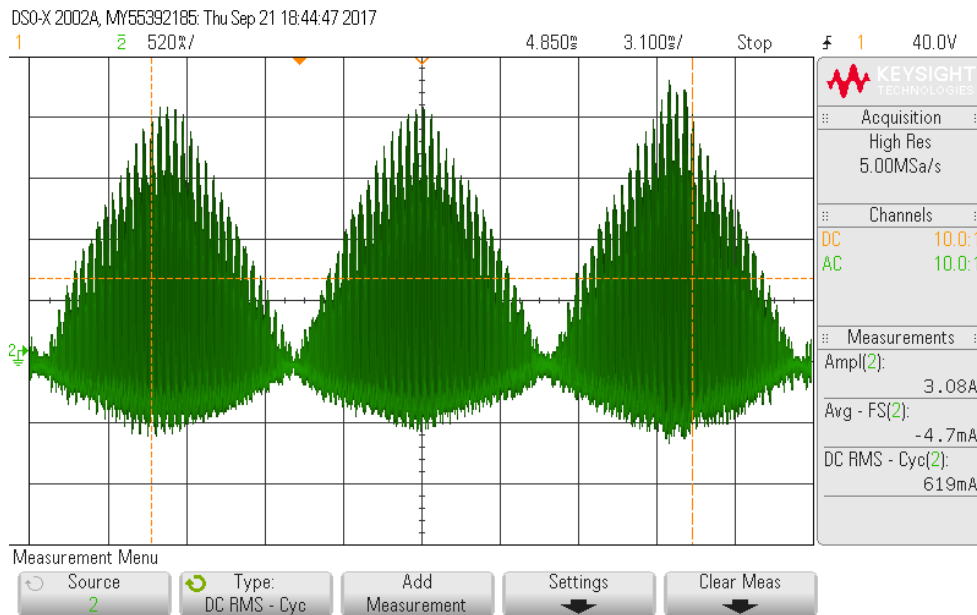


Figura 97. Corrente indutor  $L_o$  em baixa frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 98 é a corrente que percorre o indutor  $L_o$  em alta frequência, no seu ponto de maior amplitude. Seu valor máximo é de 2.65 A e o mínimo é de -1.8 A.

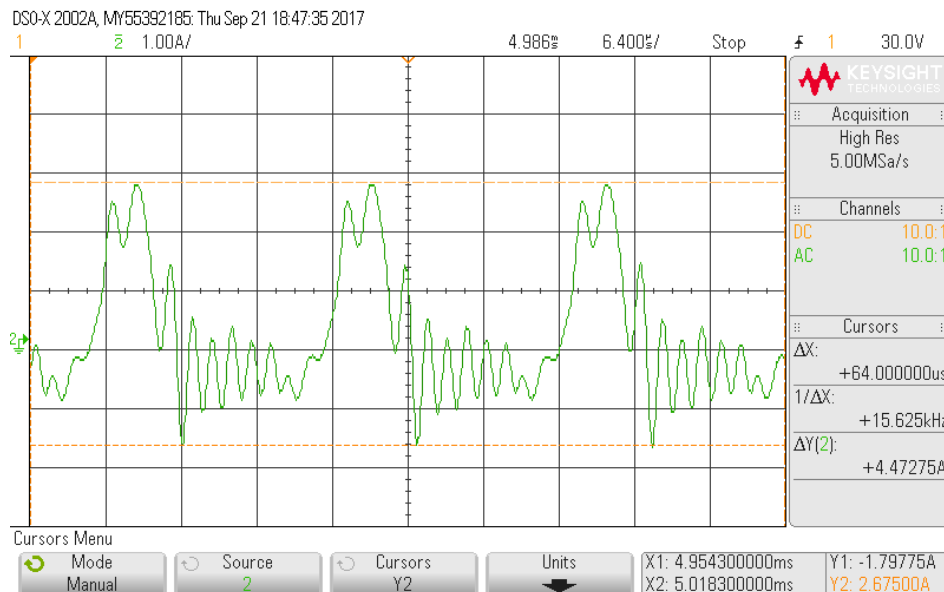


Figura 98. Corrente que percorre o indutor  $L_o$  em alta frequência do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 99 é a corrente que percorre o interruptor em alta frequência. Seu valor eficaz de corrente é de cerca de 1.2 A.

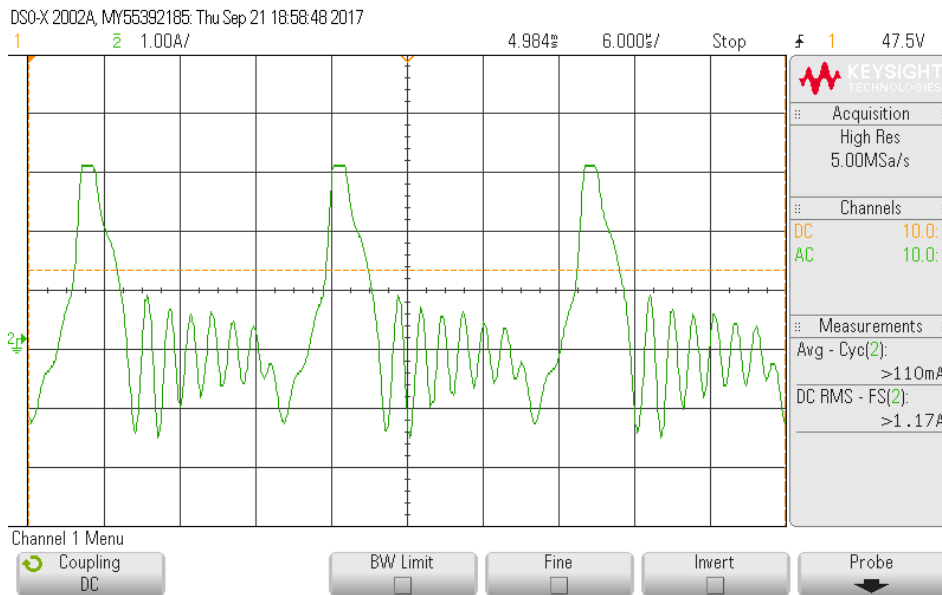


Figura 99. Corrente que percorre o interruptor do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.

A Figura 100 é a tensão e corrente de saída da topologia integrada com a carga RL, O valor da tensão de saída é de 116V, a corrente eficaz de saída é de aproximadamente de 375 mA.

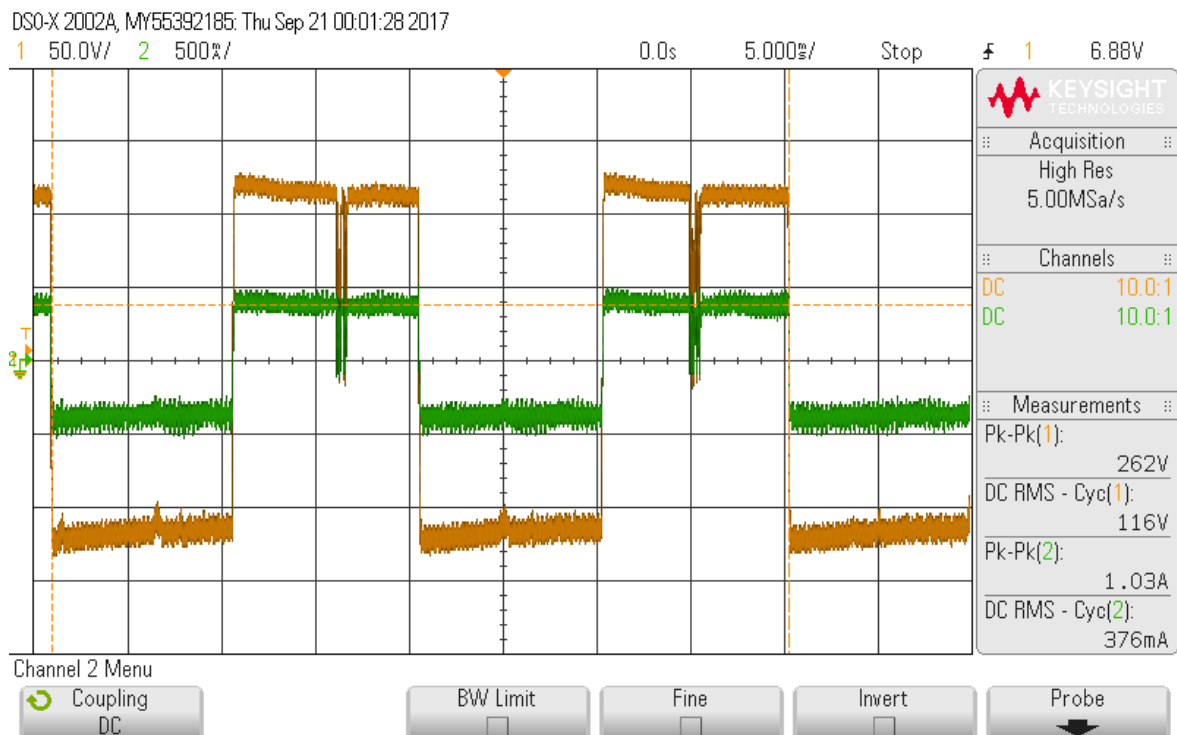


Figura 100. Tensão e Corrente de saída do conversor SEPIC em MCD com a topologia integrada carga RL.



# 6 CONFRONTO DOS RESULTADOS SEPIC MCD

Este capítulo tem como objetivo a comparação dos resultados teóricos, de simulação e experimentais.

A Tabela 18 é a comparação dos valores de corrente dos principais componentes entre os valores de correntes teóricos e os valores de corrente de simulação. É possível observar que as maiores diferenças são: a corrente eficaz do indutor  $L_i$ , a corrente médio do indutor  $L_o$ , a corrente eficaz do indutor  $L_o$  e a corrente média no interruptor.

**Tabela 18. Comparação entre os valores teóricos e os valores obtidos em simulação do conversor SEPIC MCD.**

Variável	Valores Teóricos Conversor SEPIC (A)	Valores de Simulação Conversor SEPIC (A)	Diferença (%)
Corrente mínima indutor Li	0,3	0,3	0
Corrente média indutor Li	0,2	0,2	0
Corrente máxima indutor Li	0,3	0,35	16,7
Corrente eficaz indutor Li	0,2	0,27	35
Corrente mínima indutor Lo	-0,3	-0,3	0
Corrente média indutor Lo	0,35	0,46	31,4
Corrente máxima indutor Lo	2,7	2,9	7,4
Corrente eficaz indutor Lo	0,8	1	25
Corrente média Interruptor	0,3	0,2	-33,3
Corrente eficaz Interruptor	0,6	0,6	0
Corrente média Diodo	0,8	0,85	6,25
Corrente eficaz Diodo	0,35	0,35	0

A Tabela 19 é a comparação dos valores de corrente dos principais componentes entre a simulação da topologia integrada com carga RL e a simulação da topologia integrada com carga LEDs. É possível observar que os valores das correntes, tendem a ser ligeiramente menores quando a carga são os LEDs.

**Tabela 19. Comparação entre os valores teóricos do conversor SEPIC e a Simulação da Topologia integrada com carga RL.**

Variável	Simulação Topologia Integrada CARGA RL (A)	Simulação Topologia Integrada CARGA LEDS (A)	Diferença (%)
Corrente mínima indutor Li	0,495	0,425	-14,14
Corrente média indutor Li	0,325	0,28	-13,85
Corrente máxima indutor Li	0,57	0,495	-13,16
Corrente eficaz indutor Li	0,37	0,31	-16,22
Corrente mínima indutor Lo	-0,6	-0,6	0
Corrente média indutor Lo	0,215	0,2	-6,98
Corrente máxima indutor Lo	3,4	3,2	-5,88
Corrente eficaz indutor Lo	0,94	0,85	-9,57
Corrente média Interruptor	0,325	0,28	-13,85
Corrente eficaz Interruptor	0,85	0,75	-11,76
Corrente média Diodo	0,225	0,2	-11,11
Corrente eficaz Diodo	0,7	0,65	-7,14

A Tabela 20 é a comparação dos valores das correntes eficazes dos indutores e do interruptor, entre os valores teóricos e experimentais do conversor SEPIC. É possível observar que os valores eficazes experimentais dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  são muito próximos ao valor esperado e o valor eficaz do interruptor, na prática, é pouco maior ao calculado.

**Tabela 20. Comparação entre dos valores de corrente eficaz do indutor  $L_i$ , indutor  $L_o$  e do interruptor entre o conversor SEPIC e a Simulação da Topologia integrada com carga RL.**

<b>Variável</b>	<b>Valores Teóricos Conversor SEPIC (A)</b>	<b>Valores Experimentais SEPIC (A)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Corrente eficaz indutor $L_i$	0,2	0,275	37,5
Corrente eficaz indutor $L_o$	0,8	0,92	15
Corrente eficaz interruptor	0,62	0,69	11,29



# 7. PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS CONVERSOR SEPIC MCCR

A Figura 101 é o esquemático do conversor SEPIC MCCR.

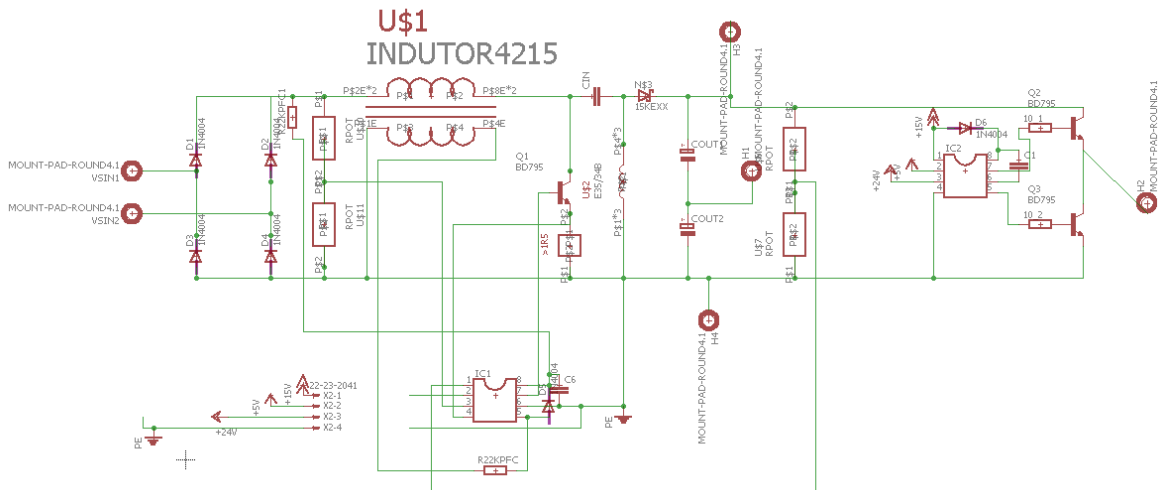


Figura 101. Esquemático do conversor SEPIC em MCCr com a utilização do circuito integrado MC34262.

A Figura 102 é o protótipo do conversor SEPIC MCCr. Os conectores em branco representam a entrada CA do circuito, o conector vermelho a saída positiva do barramento CC do conversor SEPIC, o conector verde é a massa do circuito e os conectores azuis são a saída da topologia integrada. As dimensões da placa utilizada são 125 mm de largura por 105 mm de altura. O circuito integrado MC34262 é responsável pelo controlo e acionamento do interruptor do SEPIC e o driver utilizado para os interruptores do inversor foi um IR2104.

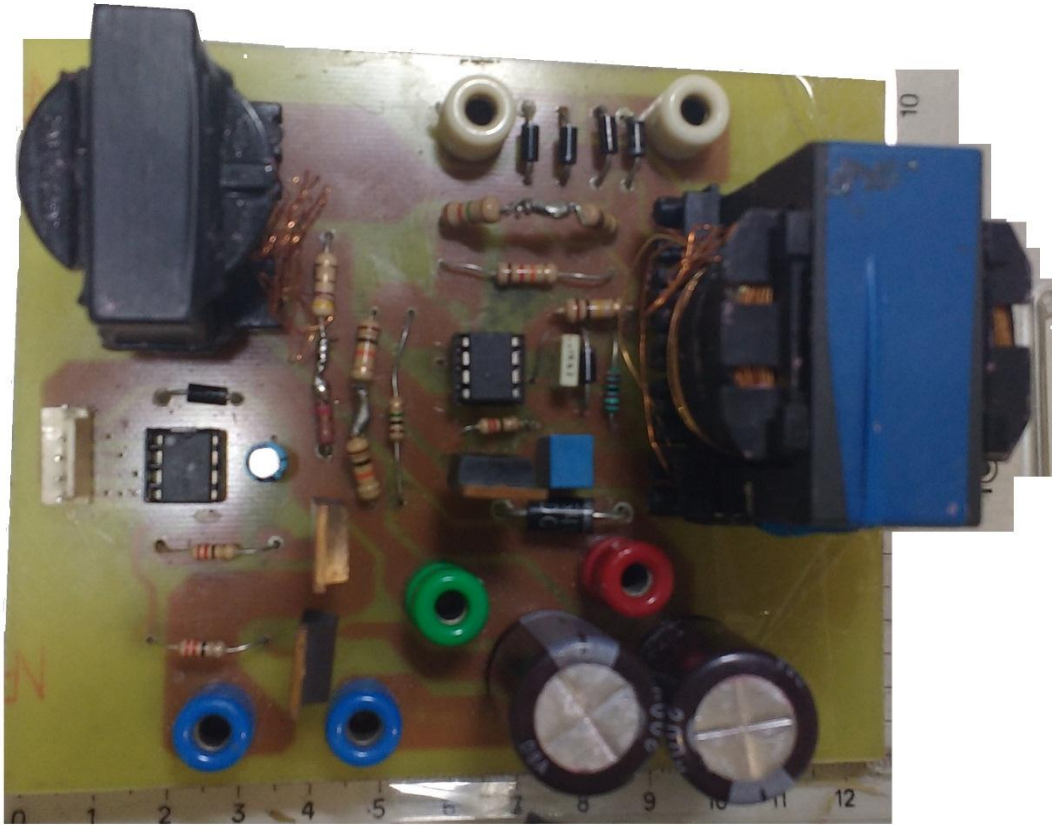


Figura 102. Protótipo do Conversor SEPIC MCCr.

O projeto dos componentes do conversor SEPIC foi feito da mesma forma de forma similar ao conversor SEPIC em MCD, a única diferença foi que o projeto foi feito para uma única tensão de entrada de 230 V.

O valor da razão cíclica crítica é dada pela Equação (93)

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_G} \quad (93)$$

A Tabela 21 são os valores calculados dos componentes do conversor SEPIC em MCCr.

**Tabela 21. Valores Utilizados no Conversor SEPIC em MCCr**

Componente	Valor	Unidade
Indutor Li	78	mH
Indutor Lo	1,7	mH
Condensador Ci	47	nF
Condensador Co	100	μF

Utilizando o *datasheet* do MC34262 [18], foram calculadas as resistências R1, R2 e R3 necessárias para fazer o controle do conversor SEPIC MCCr. As resistências R1 e R2

foram dimensionadas usando um divisor resistivo a partir da tensão de saída, para se obter uma tensão de 2,5 V no pino 1 do circuito integrado MC34262. Para o cálculo da resistência R7 foi feito o cálculo da corrente de pico do interruptor pela Equação (51), a partir deste resultado foi calculado qual o valor da resistência necessária para ter uma tensão de 1,0 V. Devida a tensão de entrada ser a mesma, os demais componentes foram obtidos do *datasheet*.

A Tabela 22 são os componentes utilizados no controlo do conversor SEPIC MCCr.

**Tabela 22. Lista de componentes utilizados no controlo do conversor SEPIC MCCr**

Nome	Componentes	Valor
D5	Diodo Recuperação Rápida	UF4007
C2	Condensador	100 nF
C5	Condensador	1 $\mu$ F
R1	Resistor	20 k $\Omega$
R2	Resistor	1,5 M $\Omega$
R3	Resistor	12 k $\Omega$
R4	Resistor	22 k $\Omega$
R5	Resistor	1,3 M $\Omega$
R6	Resistor	100 k $\Omega$
R7	Resistor	1 $\Omega$

## 7.1 Resultados

A Figura 103 é a tensão e entrada com o valor eficaz de 236 V em amarelo e os pulsos de comando em verde.

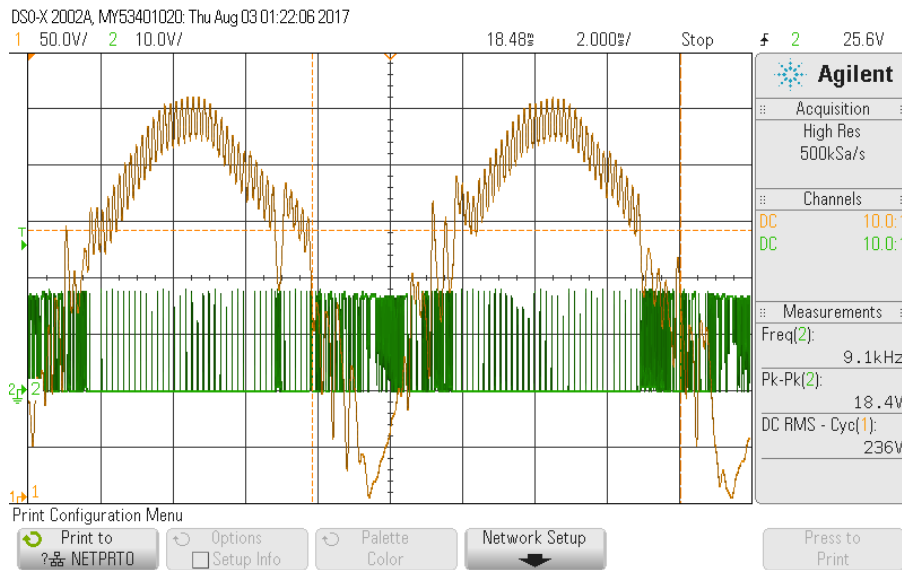


Figura 103. Tensão de Entrada e pulsos de Comando do SEPIC MCCr.

A Figura 104 e Figura 105 são os pulsos de comando e a tensão de saída. O valor da tensão de saída é de 120 V em ambas as imagens, já os pulsos de controlo variam: no primeiro opera a uma frequência de 10,8 kHz e o segundo opera a uma frequência de 76 kHz.

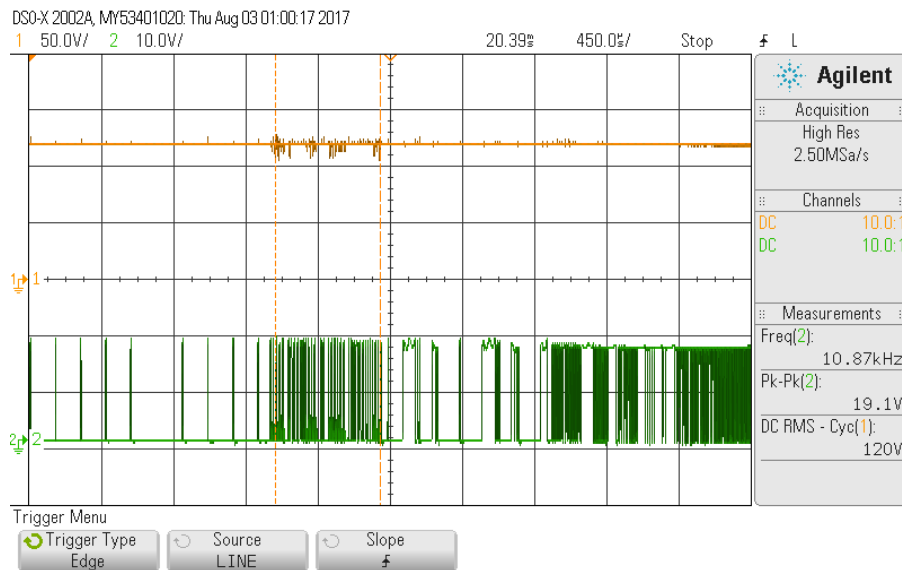


Figura 104 Tensão de Saída e Pulsos PWM do SEPIC MCCr.

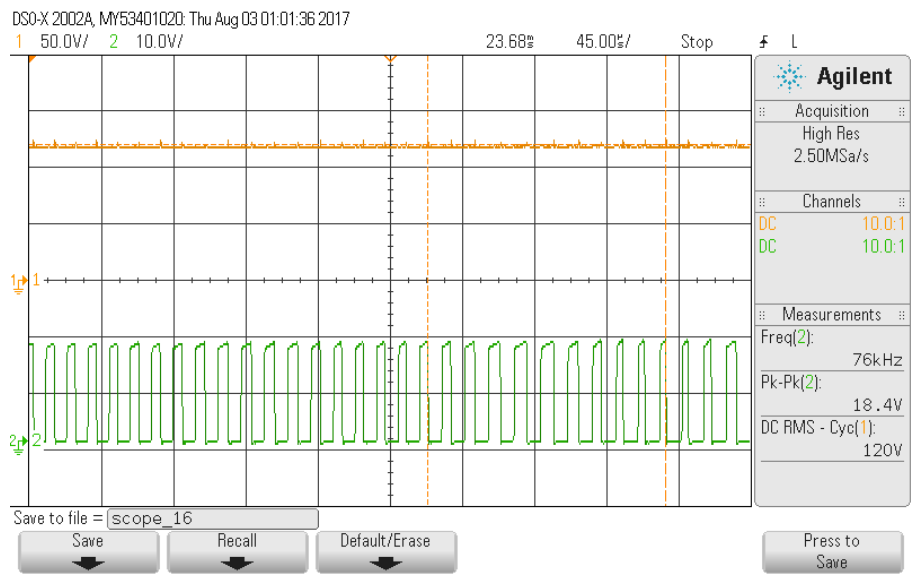


Figura 105. Tensão de Saída e Pulsos PWM do SEPIC MCCr.



A Figura 107 representa o protótipo construído.

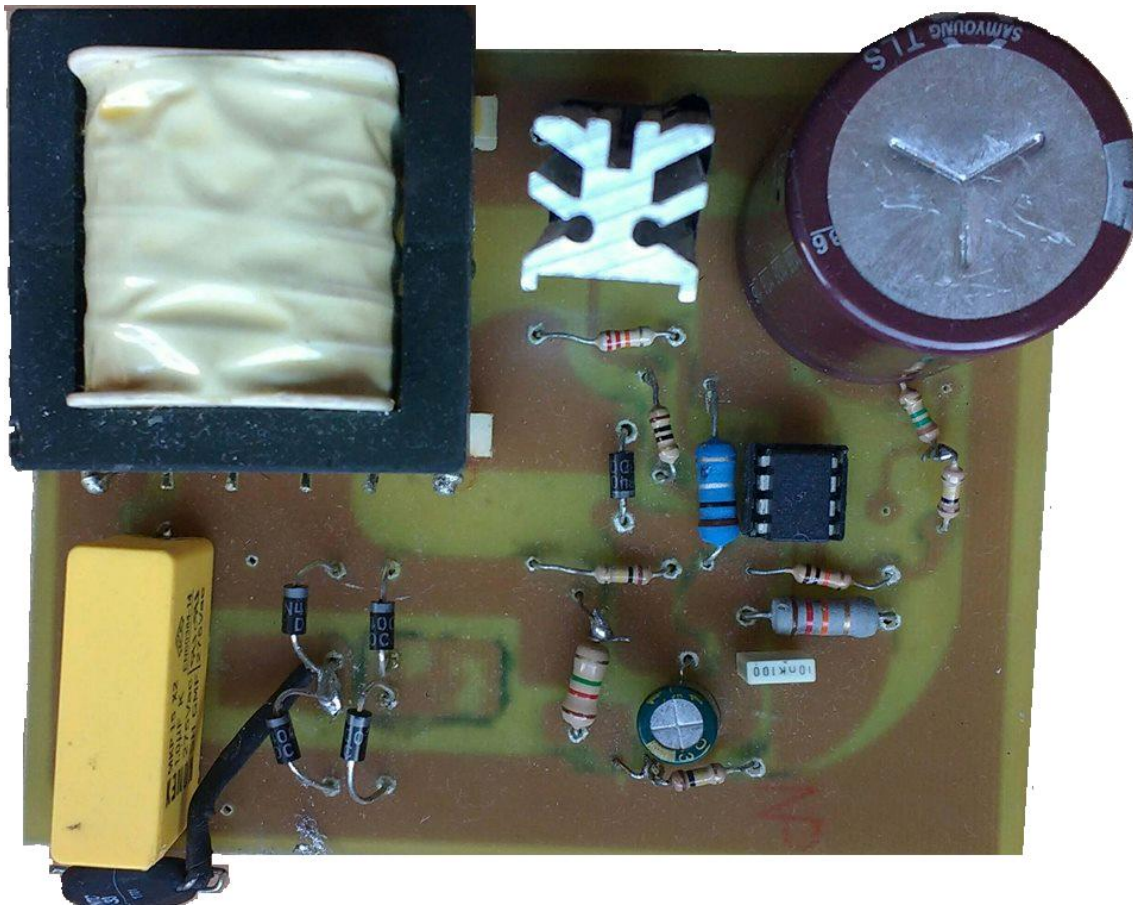


Figura 107. Protótipo do retificador Boost MCCr.

O circuito integrado utilizado para o acionamento do conversor Boost foi o MC43262 [18].

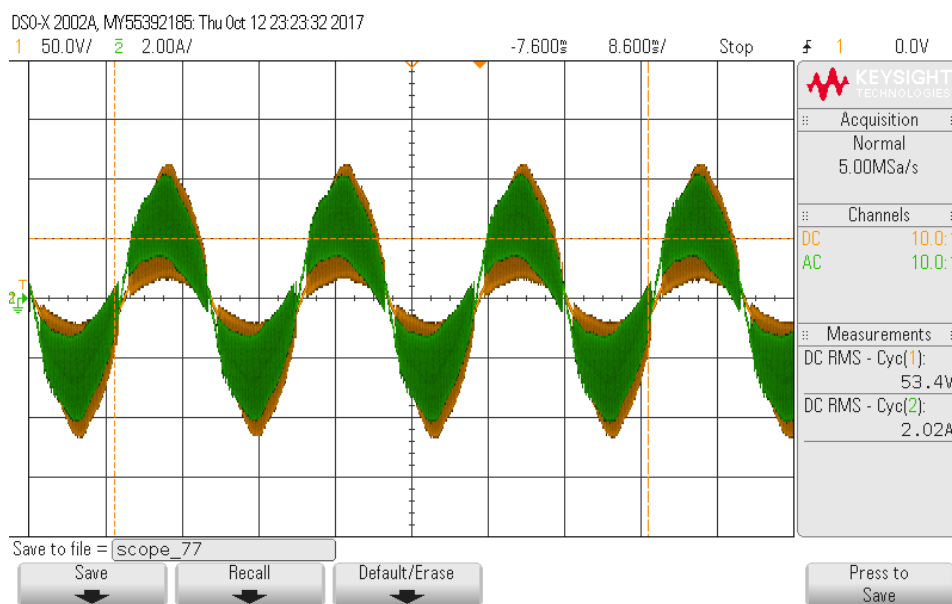
A Tabela 23 mostra os valores dos componentes utilizados, de acordo com a figura 21 de [18]. O funcionamento do retificador com esta configuração de resistências é para uma tensão de entrada de 90 a 240 VAC com uma saída de 400 V. A carga utilizada é uma resistência de 1,5 k $\Omega$ .

**Tabela 23. Lista de componentes utilizados para o retificador Boost MCCr.**

Nome	Componentes	Valor
D1, D2, D3, D4	Diodos Retificadores	1N4007
D5	Diodo Recuperação Rápida	UF4007
S	Interruptor	IR840
C2	Condensador	100 nF
C3	Condensador	330 $\mu$ F
C5	Condensador	1 $\mu$ F
R_2_1, R_5_1	Resistor	100 k $\Omega$
R_1	Resistor	10 k $\Omega$
R_2_2	Resistor	1,5 M $\Omega$
R3	Resistor	12 k $\Omega$
R4	Resistor	22 k $\Omega$
R_5	Resistor	1,2 M $\Omega$
R_6	Resistor	100 k $\Omega$
R_7	Resistor	0,1 $\Omega$

## 8.1 Resultados

A Figura 108 é a tensão de entrada e corrente de entrada do retificador Boost MCCr. O valor eficaz da tensão é 53 V e de corrente de 2 A.



**Figura 108. Tensão e corrente de entrada do retificador Boost MCCr.**

A Figura 109 e Figura 110 são os pulsos de comando, o primeiro opera a uma frequência de 8,7 kHz e o segundo opera a uma frequência de 11 kHz.

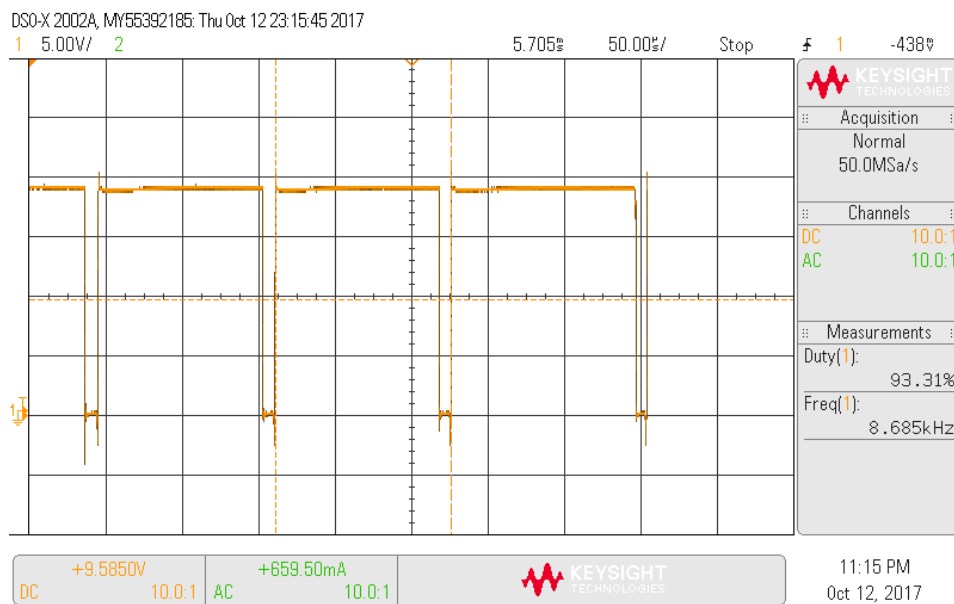


Figura 109. Pulsos de comando do retificador Boost MCCr.

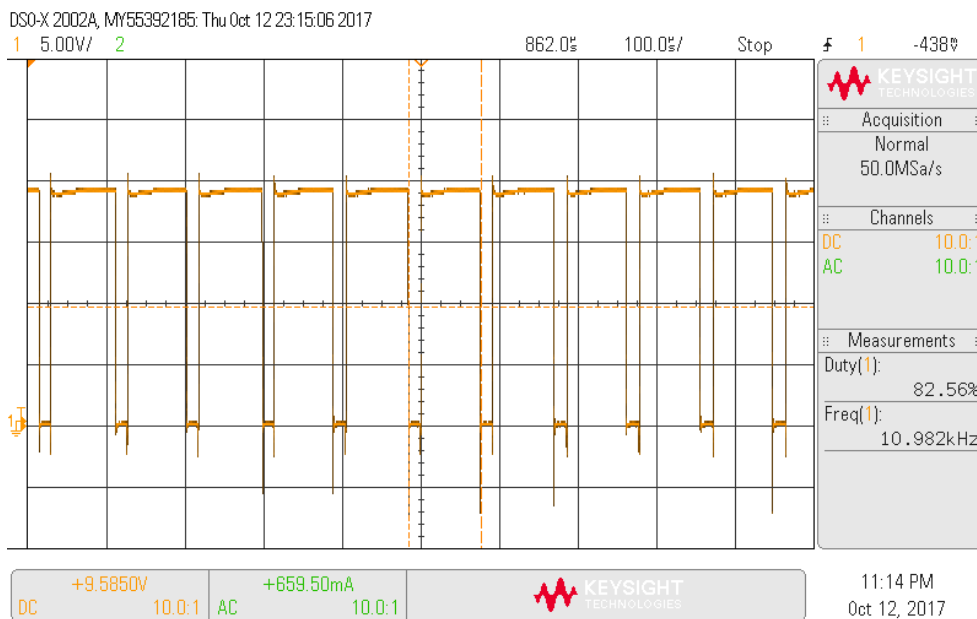


Figura 110. Pulsos de comando do retificador Boost MCCr.

A Figura 111 é tensão de saída. Não foi possível retirar as formas de onda devido às pinças de prova não suportarem tal nível de tensão.



Figura 111. Tensão de saída do retificador Boost MCCr.



## 9. CONCLUSÃO

O uso do conversor SEPIC em MCD aliado a um inversor de meia ponte com controle PWM, foi eficiente tanto em âmbito de simulação quanto na prática para a correção do fator de potência em circuitos de baixa potência, como as de lâmpadas LED AC.

As formas de ondas experimentais de corrente e de tensão do conversor SEPIC em MCD são similares às formas de ondas esperadas. Ao comparar os valores obtidos de corrente da teoria com a prática, os valores convergiram para um valor com exceção dos valores médios da corrente dos indutores  $L_i$  e  $L_o$  e do interruptor.

Na topologia integrada do conversor SEPIC com o inversor de meia ponte, fez com que as formas de onda de tensão dos componentes apresentassem valores mínimos diferentes do conversor SEPIC. Houve também uma alteração nos valores das correntes quando comparado ao valor teórico. Esta alteração nos níveis de tensão não alteraram o modo de condução do conversor SEPIC, basta observar na Figura 42 (Carga RL) e na Figura 70 (Carga LEDs) que ainda existe a descontinuidade nas correntes dos semicondutores.

Na prática, tanto o conversor SEPIC e na topologia integrada, as formas de onda de corrente observadas no indutor  $L_o$ , Indutor  $L_i$  e no interruptor apresentam as formas similares às esperadas, apesar de estas apresentarem ruídos gerados pela rede elétrica e dos

outros componentes do próprio conversor. A corrente do diodo, não foi possível ser medida, devido ao fato de ao interromper o circuito e utilizar um "jumper" para poder medir a corrente fez com que o conversor se comportasse de modo anômalo, a forma de corrente do condensador  $C_i$  não foi medida, pois o seu posicionamento na placa não era favorável. As formas de tensão do conversor não são demonstradas devido ao fato das pontas de provas de tensão não suportarem o elevado nível de tensão sobre os componentes.

Ao utilizar a topologia integrada, não foi possível chegar ao nível de potência nominal, devido ao núcleo do indutor do inversor saturar a cerca dos 190 V eficazes da tensão de entrada. Com o medidor do fator de potência o núcleo saturou aos 150 V eficazes da tensão de entrada. Mesmo com um nível de potência abaixo do nominal, foi possível observar que o conversor manteve o seu fator de potência unitário.

Tanto para o SEPIC MCCr e o Boost MCCr não foi possível fazer os testes de simulação devido ao fato do modelo do circuito integrado MC34262 não existirem no ORCAD.

Para o conversor SEPIC MCCr não foi possível obter as medidas de potência com o mesmo equipamento utilizado para o conversor SEPIC MCD devido ao fato das formas de corrente não ser muito constante, outros dois problemas foram relatados:

- O primeiro que a resistência R2 precisou ser substituída por um potenciômetro que deveria ser ajustado para poder iniciar o conversor;
- Como é necessária uma baixa ondulação de tensão de saída para que o circuito integrado MC34262 funcionasse é necessário um condensador de valor muito elevado, para a utilização do conversor junto com a topologia integrada seria necessário o dobro desta capacidade.

O conversor BOOST necessitou da utilização de um termistor NTC na entrada da alimentação para evitar o pico de corrente no início de operação do retificador. A operação do conversor é muito ruidosa devido ao fato do conversor operar na faixa auditiva do ser humano. Era esperado que o MC34262, pela sua configuração de resistências, fosse iniciado aos 90 VAC, porém, ele deu início cerca dos 50 VAC não foi possível aumentar a tensão de entrada devido ao sobre aquecimento do termistor.

## *Referências Documentais*

- [1] CARVALHO, H. M. B. “DIODOS EMISSORES DE LUZ DE ALTO BRILHO E ALTA POTÊNCIA”. DIRECTLIGHT – ARTIGO DL-05, MARÇO, 2007.
- [2] CRAFT, M. G—*LEDs challenge the incandescents,*” *IEEE Circuit Device Mag.*, vol.8, no.1, pp.24 -29, Aug. 1992
- [3] CHAO-LUNG Kuo; TSORNG-JUU Liang; KAI-HUI Chen; JIANN-FUH Chen—*Design and implementation of high frequency AC-LED driver with digital dimming Circuits and Systems (ISCAS), PROCEEDINGS OF 2010 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON , VOL., NO., PP.3713-3716, MAY 30 2010-JUNE 2*
- [4] ACRICHE, <http://www.acrich.com/en/product/prd/acriche.asp>
- [5] WEG—Manual para Correção do Fator de Potência, <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>.
- [6] KUMAR, M—NPTEL Course on Power Quality in Power Distribution Systems. Indian Institute of Technology Madras, India, <http://nptel.ac.in/courses/108106025/>
- [7] DEWAN, Shashi—*Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply.* IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. VOL. IA-17, NO. 3, MAY/JUNE 1981.
- [8] POMILIO, J. A.—Pré-reguladores de Fator de Potência - PFP, UNICAMP, Brasil, <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/pfp/Cap2.pdf>
- [9] BARBI, Ivo—Correção Ativa do Fator de Potência Retificadores Monofásicos Operando em Condução Descontínua. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, agosto de 2015.
- [10] MASSEY, R.P.; SNYDER, E. C.—*High Voltage Single-Ended DC-DC Converter.* IEEE PESC, 1977 Record, pp 156-159.

- [11] TIAN, G.; QI, W, YAN, Y; JIANG, Y.Z.—*High power factor LED power supply based on SEPIC converter*. Electronics Letters vol. 50 no. 24 pp. 1866-1868 Dec. 2014
- [12] ZHONGMING, Y.; GREENFELD, F.; ZHIXIANG, L. —*A topology study of single-phase offline ac/dc converters for high brightness white LED lighting with power factor pre-regulation and brightness dimmable*. 34th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, Orlando, USA, November 2008, pp. 1961–1967
- [13] CHIU, H.J.; LO, Y.K.; CHEN, J.T.; CHENG, S.J.; LIN, C.Y.; MOU, S.C. —*A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications*, IEEE Trans. Ind. Electron., 2010, 57, (2), pp. 735–743
- [14] COSTA, Paulo Júnior Silva—*Retificadores SEPIC monofásicos e trifásicos aplicados no processamento da energia elétrica proveniente de aerogeradores de pequeno porte*. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015
- [15] Chen, J., Chang C.—*Analysis and Design of SEPIC Converter in Boundary Conduction Mode for Universal-line Power Factor Correction Applications*
- [16] Tian, G., Qi, W., Yan, Y. Jiang Y. —*High power factor LED power supply based on SEPIC converter*. ELECTRONICS LETTERS 20th November 2014 Vol. 50 No. 24 pp. 1866–1868
- [17] FAIRCHILD, AN-8035 Design Consideration for Boundary Conduction Mode Power Factor Correction (PFC) Using FAN7930. Disponível em: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-8035.pdf>, acesso 12/10/17.
- [18] On Semiconductor, MC34262, MC33262 POWER FACTOR Controllers. Disponível em <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC34262-D.PDF>, acesso 12/10/17.
- [19] RECH, Cassiano—Capítulo 4: Inversor meia-ponte, UDESC, Brasil, [http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/yales/materiais/EPOII\\_\\_\\_Capitulo\\_4\\_\\_\\_Inversor\\_half\\_bridge.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/yales/materiais/EPOII___Capitulo_4___Inversor_half_bridge.pdf).
- [20] Jiang, H., Lin, J., Jin, S. —*Light Emitting Diodes for High AC Voltage Operation and General Lighting*, U.S. Patent 6957899, Oct. 25, 2005.

- [21] Jung, H.M., Kim J.H., Lee B.K., Yoo D.W. —*A New PWM Dimmer Using Two Active Switches for AC LED Lamp*, The 2010 International Power Electronics Conference, 2010
- [22] ZUKAUSKAS, Arturas; SHUR, Michael; GASKA, Remis—*Solid State Light*, Rensselaer Polytechnic Institute, Estados Unidos da América, [https://www.ecse.rpi.edu/homepages/shur/Solid%20State%20LightingTutorial\\_F2001.pdf](https://www.ecse.rpi.edu/homepages/shur/Solid%20State%20LightingTutorial_F2001.pdf).
- [23] SÁ JUNIOR, Edilson Mineiro—*Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação* [tese] / Edilson Mineiro Sá Júnior; orientador, Arnaldo José Perin. - Florianópolis, SC 2010.

