



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

GABRIELA MARQUES DA SILVA ARAÚJO

**PROJETO DE CONVERSOR CC-CC *SEPIC* PARA  
CONTROLE DE MÓDULOS PELTIER APLICADOS A  
UM REFRIGERADOR PORTÁTIL AUTOMOTIVO**

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2017

GABRIELA MARQUES DA SILVA ARAÚJO

**PROJETO DE CONVERSOR CC-CC *SEPIC* PARA  
CONTROLE DE MÓDULOS PELTIER APLICADOS A  
UM REFRIGERADOR PORTÁTIL AUTOMOTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador: Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2017

GABRIELA MARQUES DA SILVA ARAÚJO

**PROJETO DE CONVERSOR CC-CC *SEPIC* PARA  
CONTROLE DE MÓDULOS PELTIER APLICADOS A  
UM REFRIGERADOR PORTÁTIL AUTOMOTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em:     /     /

---

**Professor Avaliador**  
Avaliador

---

**Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino**  
Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2017

*Este trabalho é dedicado à minha mãe, Nazilma.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe guerreira, Nazilma Marques da Silva, pelo esforço incondicional para me proporcionar excelente qualidade nos estudos.

Agradeço também a todas as pessoas que contribuíram de algum modo para tornar minha graduação mais leve, especialmente, a Michelly Menezes, Ivana Crisóstomo, Emmanuel Carvalho, Itaiara Carvalho, Luiz Claver, Ana Paula Rodrigues, Maura Rodríguez e Jozias Rufino.

Por fim, sou muito grata ao meu orientador, Professor Dr. Montiê Alves Vitorino, por ter acreditado e explorado o meu potencial para concretização deste trabalho.

*“Be not afraid of growing slowly, be afraid only of standing still.”*  
*(Provérbio Chinês)*

# RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo e projeto do conversor CC-CC de topologia *SEPIC*, visando a refrigeração de líquidos de forma compacta, ao lançar mão do efeito termoelétrico de módulos Peltier.

**Palavras-chave:** conversor CC-CC, peltier, refrigeração.

# ABSTRACT

The main goal of this work was to study and design a CC-CC SEPIC converter for a compact gadget which aims to cool liquids down. The thermoelectric effect under the Peltier module was explored.

**Keywords:** CC-CC converter, peltier, cooling.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Módulo Peltier real . . . . .	16
Figura 2 – Módulo Peltier em detalhe . . . . .	17
Figura 3 – Esquemático de um refrigerador termoelétrico . . . . .	17
Figura 4 – Curva de performance 1 . . . . .	19
Figura 5 – Curva de performance 2 . . . . .	20
Figura 6 – Conversor simples . . . . .	22
Figura 7 – Geração de PWM . . . . .	23
Figura 8 – (a) Conversor SEPIC; (b) Operação com a chave fechada; (c) Operação com a chave aberta. . . . .	25
Figura 9 – Formas de onda das correntes no SEPIC: (a) Indutor 1; (b) Indutor 2; (c) Capacitor de acoplamento; (d) Capacitor de saída; (e) Chave; (f) Diodo . . . . .	30
Figura 10 – Esquemático do conversor SEPIC no ambiente de simulação . . . . .	35
Figura 11 – Corrente no indutor 1 . . . . .	36
Figura 12 – Variação da corrente no indutor 1 . . . . .	36
Figura 13 – Corrente no indutor 2 . . . . .	37
Figura 14 – Variação da corrente no indutor 2 . . . . .	37
Figura 15 – Tensão na saída do conversor . . . . .	38
Figura 16 – Variação da tensão na saída do conversor . . . . .	38
Figura 17 – Corrente na saída do conversor . . . . .	39
Figura 18 – Esquemático completo do conversor SEPIC . . . . .	40
Figura 19 – Esquema do Regulador de Tensão L7805CV . . . . .	41
Figura 20 – Microcontrolador . . . . .	41
Figura 21 – Conversor SEPIC . . . . .	42
Figura 22 – Condicionamento da saída do sensor de corrente . . . . .	43
Figura 23 – Condicionamento da saída do sensor de tensão . . . . .	43
Figura 24 – Circuito Driver . . . . .	44
Figura 25 – Circuito para acionamento do cooler 1 . . . . .	44
Figura 26 – Circuito para acionamento do cooler 2 . . . . .	45
Figura 27 – Visão 3D superior da PCI . . . . .	46
Figura 28 – Visão 3D inferior da PCI . . . . .	46

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CC-CC	Corrente Contínua - Corrente Contínua
<i>SEPIC</i>	<i>Single-Ended Primary-Inductor Converter</i>
MCC	Modo de Condução Contínua
PCI	Placa de Circuito Impresso
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
CI	<i>Circuito Integrado</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos	13
<b>2</b>	<b>EFEITO TERMOELÉTRICO</b>	<b>14</b>
2.1	Efeito Seebeck	14
2.2	Efeito Peltier	14
2.3	Efeito Thomson	15
2.4	Aplicações de Dispositivos Termoelétricos	15
2.5	Dispositivos Termoelétricos vs Eficiência	16
2.6	O Módulo Peltier	16
<b>3</b>	<b>DETERMINAÇÃO DA CARGA TÉRMICA</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>CONVERSORES CC-CC CHAVEADOS</b>	<b>21</b>
4.1	Introdução	21
4.2	Controle de Conversores CC-CC Chaveados	21
4.3	Método de Controle de Conversores CC-CC Chaveados	22
<b>5</b>	<b>CONVERSOR CC-CC SEPIC</b>	<b>24</b>
5.1	Introdução	24
5.2	Modo de Condução Contínua	24
5.3	Determinação das Tensões	26
5.4	Determinação do Ciclo de Trabalho	27
5.5	Determinação das Correntes	27
5.5.1	Corrente no Indutor 1	27
5.5.2	Corrente no Indutor 2	28
5.5.3	Corrente no Diodo	28
5.5.4	Corrente na Chave	28
5.5.5	Corrente no Capacitor de Acoplamento	29
5.5.6	Corrente no Capacitor de Saída	29
<b>5.6</b>	<b>Determinação dos Elementos Reativos</b>	<b>29</b>
5.6.1	Determinação da Indutância de Entrada	29
5.6.2	Determinação da Indutância de Saída	30
5.6.3	Determinação da capacitância de acoplamento	31
5.6.4	Determinação da Capacitância de Saída	31
<b>5.7</b>	<b>Determinação dos Componentes Ativos</b>	<b>31</b>

5.7.1	Seleção da Chave Condutora . . . . .	31
5.7.2	Seleção do Diodo . . . . .	33
<b>5.8</b>	<b>Dimensionamento do Conversor . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÃO DO CONVERSOR CC-CC SEPIC . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>6.1</b>	<b>Simulação em Malha Aberta . . . . .</b>	<b>35</b>
6.1.1	Corrente no Indutor 1 . . . . .	35
6.1.1.1	Varição da Corrente no Indutor 1 . . . . .	35
6.1.2	Corrente no Indutor 2 . . . . .	35
6.1.2.1	Varição da Corrente no Indutor 2 . . . . .	35
6.1.3	Resposta na Saída do Conversor . . . . .	37
6.1.3.1	Tensão na Saída do Conversor . . . . .	37
6.1.3.1.1	Varição da Tensão na Saída do Conversor . . . . .	37
6.1.3.2	Corrente na Saída do Conversor . . . . .	38
<b>7</b>	<b>PROJETO DA PCI DO CONVERSOR CC-CC SEPIC . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>7.1</b>	<b>Esquemático . . . . .</b>	<b>40</b>
7.1.1	Regulador de Tensão . . . . .	41
7.1.2	Microcontrolador . . . . .	41
7.1.3	Conversor SEPIC . . . . .	41
7.1.4	Circuitos de Condicionamento de Sinal . . . . .	42
7.1.5	Driver . . . . .	42
7.1.6	Circuitos para Acionamento dos Coolers . . . . .	44
7.1.7	Placa de Circuito Impresso . . . . .	45
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>48</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A busca constante por inovação e eficiência motiva pesquisas sobre diferentes métodos e materiais para aplicações em produtos muitas vezes já consolidados no mercado.

O módulo Peltier é resultado de muitas destas pesquisas e pode ser usado como um artifício para mudar a forma como acondicionamos os alimentos, por exemplo.

Sendo um dispositivo que lança mão do princípio da termoeletricidade, o módulo Peltier é capaz de converter energia elétrica em energia térmica, ocupando bem menos espaço que equipamentos refrigeradores ou aquecedores tradicionais. Por esta razão, pensou-se em uma aplicação automotiva para o mesmo, visando a refrigeração de líquidos.

Dado que a fonte de alimentação utilizada deve ser a bateria do próprio veículo, faz-se necessário o projeto de um conversor para regular o sinal de tensão. Foi selecionado o conversor CC-CC SEPIC para tal aplicação.

Os capítulos seguintes detalham todo o processo, desde a determinação do número de módulos utilizados, passando pela escolha e projeto do conversor, até o projeto da placa de circuito impresso do refrigerador.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o projeto e simulação de um conversor de topologia *SEPIC*. Mais especificamente, tem-se:

- A apresentação do conversor;
- O dimensionamento de seus componentes;
- A simulação do conversor no software LTspice;
- O projeto da PCI no software Altium;

## 2 EFEITO TERMOELÉTRICO

A termoeletricidade é um processo de duas vias. Uma delas se refere à geração de uma diferença de temperatura em um material, dada uma diferença de potencial elétrico; a outra é exatamente oposta, na qual a aplicação de uma corrente elétrica implica uma diferença de temperatura.

O termo “efeito termoeletrico” engloba, separadamente, três efeitos.

### 2.1 Efeito Seebeck

Acidentalmente, o físico Thomas Johann Seebeck, em 1821, descobriu a existência de uma diferença de potencial nas extremidades de uma barra metálica, devido a um gradiente de temperatura ao longo dela. Seus experimentos se estenderam com junções metálicas de condutores distintos, descobrindo que, a partir de uma diferença de temperatura entre duas junções conectadas eletricamente, uma diferença de potencial poderia ser obtida, o que é representado pela seguinte equação:

$$\Delta V = S\Delta T_{12} \quad (2.1)$$

A constante de proporcionalidade  $S$  é denominada coeficiente de Seebeck e  $\Delta T_{12}$ , a diferença de temperatura entre as junções.

### 2.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier foi observado pelo físico Jean Charles Peltier, em 1834, sendo exatamente oposto ao efeito Seebeck. O efeito Peltier é conhecido como a geração de uma diferença de temperatura entre as junções, dada a existência de um fluxo de corrente por elas. O calor gerado por unidade de tempo é definido conforme a seguinte equação:

$$\dot{Q} = (\Pi_A - \Pi_B)I \quad (2.2)$$

$\Pi_A$  representa o coeficiente de Peltier do condutor A e  $\Pi_B$  representa o coeficiente de Peltier do condutor B.

Se o sentido da corrente for invertido, o mesmo acontece com a diferença de temperatura entre as junções.

## 2.3 Efeito Thomson

O efeito Thomson foi observado pelo físico William Thomson (Lord Kelvin), em 1851. Ele descreve o aquecimento ou resfriamento de um condutor sob um gradiente de temperatura.

Se uma densidade de corrente  $J$  passa por um condutor homogêneo, o efeito Thomson prevê uma taxa de produção de calor por unidade de volume, descrita pela seguinte relação:

$$\dot{q} = -KJ \cdot \nabla T \quad (2.3)$$

Em que  $\nabla T$  representa o gradiente de temperatura e  $K$  representa o coeficiente de Thomson.

## 2.4 Aplicações de Dispositivos Termoelétricos

Há diversas aplicações do efeito termoelétrico, tais como:

- Em geradores termoelétricos, para reciclagem de energia em usinas elétricas, convertendo calor residual em potência elétrica adicional;
- Para medição de temperatura;
- Em assentos da indústria automobilística;
- Em vestimentas com controle de temperatura;
- Em desumidificadores;
- Para o resfriamento de microprocessadores (inclusive em situações de *overclocking*);
- Em aplicações espaciais, para deslocamento do calor proveniente da incidência solar na fuselagem de uma nave;
- Em refrigeradores compactos e sem partes móveis, nos quais suas vantagens se sobrepõem à desvantagem da baixa eficiência.

Alguns exemplos de materiais termoelétricos são o Telureto de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) e o Telureto de Chumbo ( $PbTe$ ) – ambos semicondutores - e as ligas de silício-germânio e bismuto-antimônio.

## 2.5 Dispositivos Termoelétricos vs Eficiência

Há três requisitos para que um material seja considerado um bom termoelétrico: possuir alta condutividade elétrica; baixa condutividade térmica, pois a transferência de calor ocorre a uma taxa pequena, mantendo, portanto, as junções em temperaturas distintas e opostas; e alto coeficiente de Seebeck. Devido ao fato dos metais possuírem um coeficiente de Seebeck baixo, os semicondutores vêm se popularizando como materiais termoelétricos, sobretudo o Telureto de Bismuto.

Todavia, a eficiência dos dispositivos termoelétricos ainda é baixa. Por exemplo, em aplicações de refrigeração, junções termoelétricas têm 25% da eficiência dos meios de refrigeração tradicionais a compressão. Por esta razão, o resfriamento termoelétrico é usado, geralmente, apenas em ambientes onde a natureza de estado sólido (inexistência de partes móveis, manutenção baixa, tamanho compacto e insensibilidade à orientação) supera a exigência por eficiência.

## 2.6 O Módulo Peltier

Também conhecido como célula Peltier, é um dispositivo cujo princípio de funcionamento é o efeito que leva o mesmo nome. As Figuras 1 e 2 ilustram um dispositivo real, objeto de controle do projeto, e um esquemático, mostrando como se organizam os semicondutores em seu interior, respectivamente.

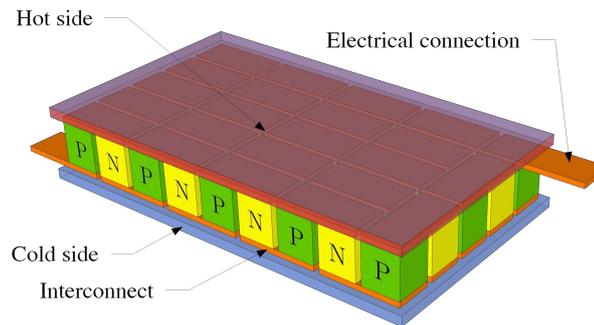
Figura 1 – Módulo Peltier real



Fonte: Google

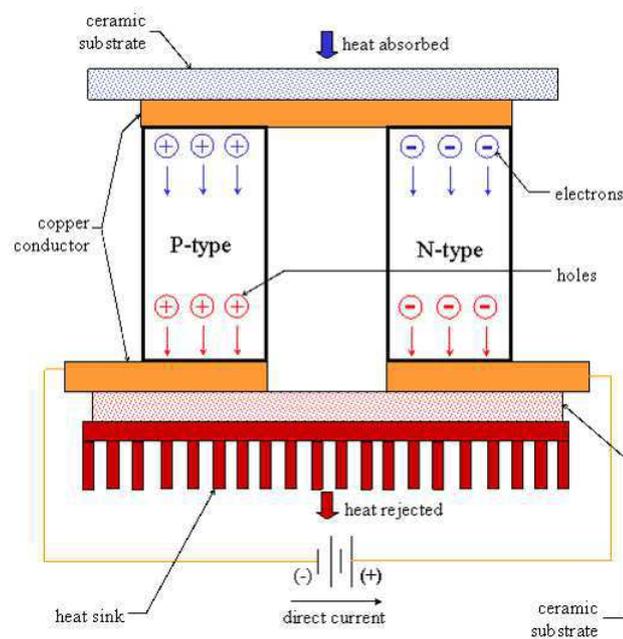
Nota-se que os semicondutores se conectam por intermédio de pequenas placas, de cor laranja, formando junções. Acima e abaixo delas há duas placas maiores, das quais a inferior, de cor azul, representa a face fria da célula, enquanto que a superior, de cor vermelha, representa a face quente. No contexto do projeto, a face fria absorverá calor e o transferirá para a face quente, que encontrar-se-á conectada a um dissipador de calor. A Figura 3 ilustra uma ampliação com apenas dois semicondutores.

Figura 2 – Módulo Peltier em detalhe



Fonte: Wikipedia - Thermoelectric cooling

Figura 3 – Esquemático de um refrigerador termoelétrico



Fonte: (MCKENZIE, 2005)

Uma vez que existe um fluxo de corrente elétrica pelo dispositivo, ocorrerá uma diminuição da temperatura nas junções por onde ela flui do semicondutor do tipo N para o semicondutor do tipo P. Todas estas junções se concentram de um mesmo lado da célula; contrariamente, todas as junções nas quais a corrente flui do semicondutor do tipo P para o semicondutor do tipo N se concentram do lado oposto. Em suma, várias junções são combinadas, dando uma impressão de unicidade.

Um único módulo produz, tipicamente, uma diferença de temperatura máxima de 70°C entre suas faces, podendo dissipar em torno de 100 J/s de calor. Se submetido a cargas maiores, torna-se menos eficiente, pelo fato de que o dispositivo precisa dissipar tanto o calor que é deslocado da face fria para a quente, quanto o calor que é gerado durante sua operação.

### 3 DETERMINAÇÃO DA CARGA TÉRMICA

Este capítulo tem como objetivo determinar a carga térmica do líquido, que consiste na quantidade de calor que deve ser retirada dele, a fim de resfriá-lo a uma temperatura de 5°C.

O modo como deve ocorrer o resfriamento é por transferência de calor, em que o corpo de maior temperatura, ou seja, o recipiente contendo o líquido, transferirá calor para o corpo de menor temperatura, até que ambas se igualem. A fim de mensurar a quantidade de calor transferido, a seguinte relação deve ser utilizada:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (3.1)$$

$m$  é a massa,  $c$  é o calor específico do líquido e  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura inicial  $T_A$  (temperatura ambiente) e a temperatura final  $T_C$  do líquido (temperatura da face fria da célula Peltier).

Sejam 350ml de água a substância em questão. A Tabela 1 traz os valores correspondentes das variáveis requeridas para o cálculo, considerando a temperatura ambiente de 25°C:

Tabela 1 – Parâmetros para o cálculo da quantidade de calor

$m$ (g)	1/ml
$c$ (cal/g °C)	1
$\Delta T$ (°C)	20

Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto,

$$Q = 350 \times 1 \times 20 = 7000cal = 29288J \quad (3.2)$$

A partir da análise do funcionamento do módulo Peltier é possível determinar em quanto tempo se pode alcançar o objetivo de resfriar a célula à temperatura de 5°C. A Tabela 2 traz especificações acerca da performance do dispositivo utilizado, o módulo TEC1-12706, fabricado pela Hebei I.T..

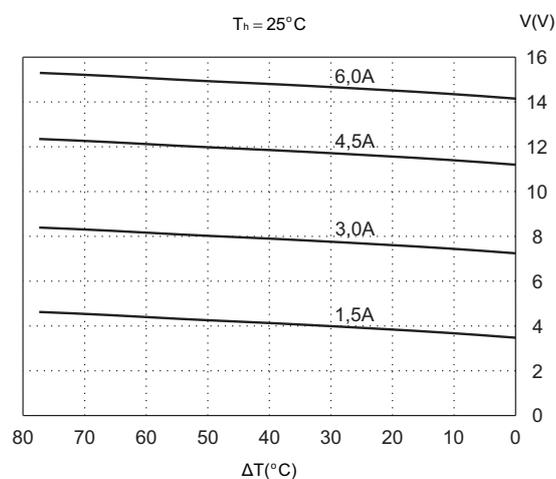
A tensão e a corrente de operação da célula Peltier deve ser determinada. A curva de performance ilustrada pela Figura 4, fornecida pelo fabricante, será útil para este fim. Nota-se que é possível fixar um valor de corrente ou de tensão e a partir dele e da diferença de  $\Delta T$  já calculada, determinar o outro.

Tabela 2 – Especificações de performance do módulo TEC1-12706

Temperatura da face quente (°C)	25°C	50°C
$Q_{max}$ (W)	50	57
$\Delta T_{max}$ (°C)	66	75
$I_{max}$ (A)	6,4	6,4
$V_{max}$ (V)	14,4	16,4
Resistência do módulo ( $\Omega$ )	1,98	2,30

Fonte: Folha de dados do TEC1-12706

Figura 4 – Curva de performance 1



Fonte: Folha de dados do TEC1-12706

Escolheu-se a corrente de operação 6A. Portanto, para  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  e  $I = 6\text{A}$ , a tensão de operação da célula deve ser de aproximadamente 14,5V.

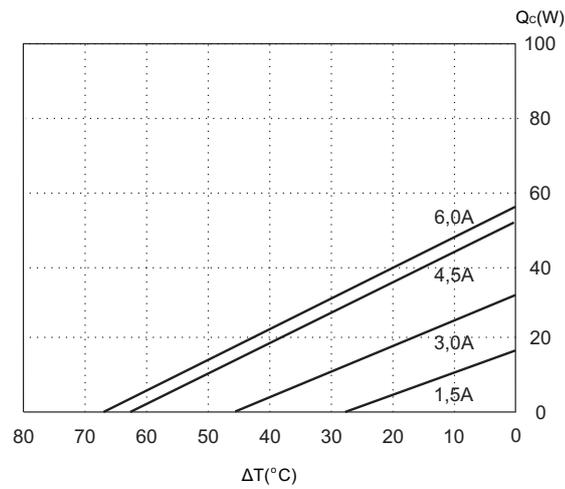
A curva de performance ilustrada pela Figura 5, também retirada da folha de dados do dispositivo, auxilia na determinação da quantidade de energia que o módulo é capaz de drenar. Nota-se que, dada a diferença de temperatura  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  e a corrente de operação  $I = 6\text{A}$ ,  $Q_c = 40\text{W}$ , correspondente a 40J/s.

Portanto, sabendo-se que uma célula de Peltier é capaz de drenar 40J/s, o próximo passo é determinar quanto tempo levaria para dissipar os 29288J de energia. O cálculo é desenvolvido a seguir:

$$t = \frac{29288}{40} = 732,2\text{s} \approx 12\text{min} \quad (3.3)$$

Conectando-se dois módulos em série, o tempo de resfriamento cai pela metade. Em vista disso, a tensão requerida deve dobrar para 29V. Têm-se, portanto, definidos os dois parâmetros de operação dos módulos, os quais são relevantes para o projeto do conversor.

Figura 5 – Curva de performance 2



Fonte: Folha de dados do TEC1-12706

Visto que a aplicação é automotiva, a fonte de tensão contínua disponível é a própria bateria do carro, capaz de fornecer apenas 12V. Como consequência destes parâmetros, o conversor deve ser do tipo elevador. Propõe-se, portanto, a utilização do conversor CC-CC *SEPIC*, do inglês *Single-Ended Primary-Inductance Converter*, apropriado para a aplicação.

## 4 CONVERSORES CC-CC CHAVEADOS

### 4.1 Introdução

Os conversores CC-CC são amplamente utilizados em fontes de alimentação reguladas e em aplicações para acionamento de motores. Frequentemente, a entrada destes conversores é um sinal de tensão contínuo não-regulado, obtido pela retificação do sinal da rede. Tendo em vista que a amplitude do sinal da rede está sujeita a variações, o sinal retificado tende a variar igualmente. Conversores CC-CC são, portanto, utilizados para converter o sinal contínuo não regulado de entrada em um sinal contínuo controlado no nível de tensão desejada. (MOHAN, 1995)

Há várias topologias de conversores CC-CC. Três delas são básicas, das quais muitas outras derivam:

- *Buck*, ou abaixadora, cuja tensão de saída é menor que a tensão de entrada;
- *Boost*, ou elevadora, cuja tensão de saída é maior que a tensão de entrada;
- *Buck-Boost*, cuja tensão de saída pode tanto ser maior quanto menor que a tensão de entrada.

São topologias bastante simples, porém, apresentam duas desvantagens principais: entrada e saída não isoladas e variação elevada da tensão de saída. Outra característica é que possuem baixo ganho de tensão.

Conversores tais como *Luo*, *Cúk* e *SEPIC* são derivações das topologias básicas, contando também com a presença de um filtro passa-baixas. O resultado é que a variação da tensão de saída destes conversores é bem pequena, em torno de 2%. (LUO, 2005)

Todos os conversores acima mencionados são do tipo não-isolado. Diferentemente deles, os conversores isolados possuem um transformador que isola os estágios de entrada e saída. Os mais conhecidos são o *Push-Pull*, o *Flyback* e o Meia Ponte. As vantagens com relação aos demais são duas, alto ganho de tensão e alto isolamento entre entrada e saída.

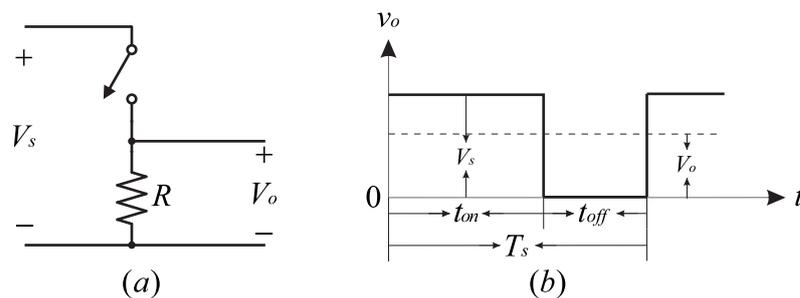
### 4.2 Controle de Conversores CC-CC Chaveados

Como já mencionado, a tensão média dos conversores CC-CC deve permanecer constante, insensível às oscilações de carga e de entrada. Isto só é possível porque os conversores têm como principal componente uma chave semicondutora controlável, que

pode ser um tiristor ou transistor de potência. Alguns exemplos são o *SCR*, o *TRIAC*, o *GTO* – todos tiristores; o *IGBT*, o *GTO* e o *MOSFET* – todos transistores.

Dada uma tensão de entrada em um conversor CC-CC, a tensão média de saída é controlada por meio do controle do tempo em que as chaves se encontram no estado de condução ( $t_{on}$ ) ou de bloqueio ( $t_{off}$ ). A fim de ilustrar este conceito, segue um conversor básico mostrado na Figura 6, em que o valor médio  $V_o$  da tensão de saída  $v_o$  depende de  $t_{on}$  e de  $t_{off}$ .

Figura 6 – Conversor simples



Fonte: (MOHAN, 1995)

### 4.3 Método de Controle de Conversores CC-CC Chaveados

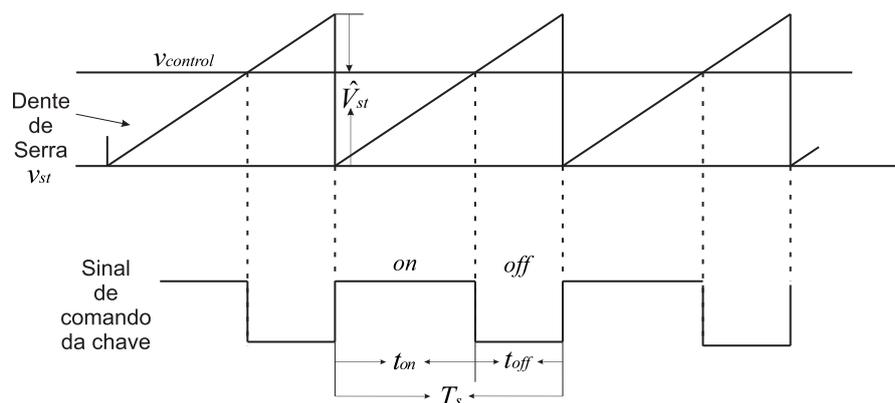
Há vários métodos de controle do chaveamento de um transistor. O escolhido para o projeto consiste no chaveamento a uma frequência constante, ou seja, a um período  $T_s = t_{on} + t_{off}$  constante) e ajuste de  $t_{on}$  para obter a tensão média de saída desejada. Este método é conhecido como modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse-Width Modulation*), ou *PWM*, no qual o ciclo de trabalho da chave  $D$ , definido como a relação entre o tempo em que a chave conduz e o período de chaveamento, é variável.

No modo de chaveamento a uma frequência constante, o sinal de *PWM* é gerado comparando-se um sinal de controle com um sinal periódico, como mostrado na Figura 7. O sinal de controle é geralmente obtido pela amplificação do erro, em que o erro é o resultado da diferença entre o sinal desejado e o sinal de saída. A frequência do sinal periódico, aqui representado por um dente de serra, determina a frequência de chaveamento do conversor.

Quando o sinal de erro amplificado ultrapassa o pico do sinal dente de serra, a tensão de controle  $v_{control}$  é ligada, polarizando a chave. Caso contrário, a chave permanece bloqueada. Em termos do sinal de controle e do pico do sinal periódico  $\hat{V}_{st}$ , o ciclo de trabalho pode ser expresso como:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{st}} \quad (4.1)$$

Figura 7 – Geração de PWM



Fonte: (MOHAN, 1995)

Por fim, há de dois modos de operação distintos dos conversores, o Modo de Condução Contínua e o Modo de Condução Descontínua. Eles se referem à continuidade de corrente nos elementos indutivos. Devido à pouca aplicação do modo de condução descontínua, este modo de operação não será abordado ao longo deste trabalho.

## 5 CONVERSOR CC-CC SEPIC

Neste capítulo é realizada a análise do princípio de funcionamento do conversor *SEPIC*.

### 5.1 Introdução

O conversor com indutância simples no primário, *SEPIC* - do inglês *Single-Ended Primary-Inductance*, é uma topologia de conversor CC-CC derivada do conversor *Boost*. O que diferencia um do outro é a adição de um filtro passa-baixa LC entre os estágios de entrada e saída do conversor *Boost*, resultando no conversor *SEPIC*. Sua tensão de saída pode ter valor maior ou menor que a de entrada, a depender do ciclo de trabalho do sinal que comanda a operação da chave. Por esta razão, esta topologia de conversor é bastante útil quando a tensão de entrada não é regulada.

O que poderia ser considerada uma desvantagem é o fato de o conversor *SEPIC* possuir dois indutores e, portanto, ser relativamente maior que o conversor *Boost*, por exemplo. Todavia, é viável que estes elementos sejam acoplados, o que o confere outra vantagem: para uma mesma variação da corrente no indutor, é necessária somente 50% da indutância do projeto original contendo dois indutores. (FALIN, 2008)

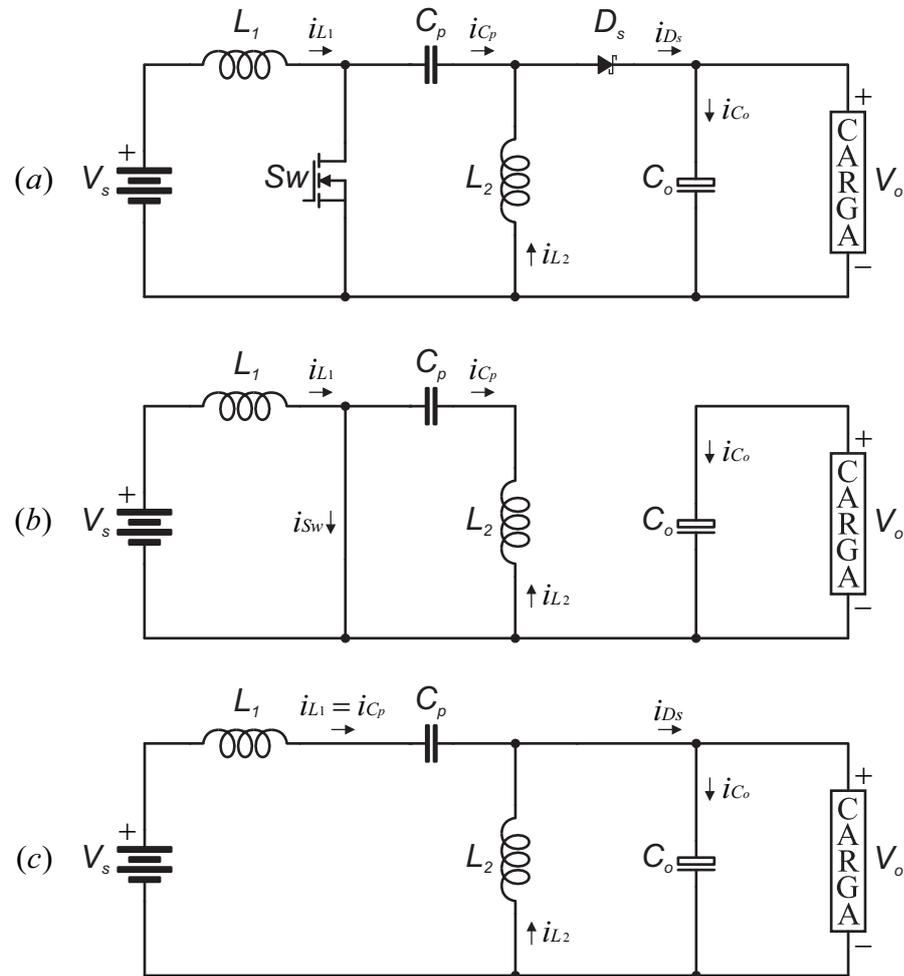
### 5.2 Modo de Condução Contínua

A Figura 8 (a) ilustra o circuito representativo do conversor *SEPIC*, constando dos seguintes componentes:

- Indutor de entrada,  $L_1$ ;
- Chave *MOSFET*,  $S_w$ ;
- Capacitor de acoplamento,  $C_p$ ;
- Indutor de saída,  $L_2$ ;
- Diodo,  $D_s$ ;
- Capacitor de saída,  $C_o$ .

O conversor possui dois estágios de operação no MCC. São eles: operação com a chave fechada/ligada e operação com a chave aberta/desligada. Nas Figuras 8 (b) e

Figura 8 – (a) Conversor SEPIC; (b) Operação com a chave fechada; (c) Operação com a chave aberta.



Fonte: a própria autora

(c), pode-se observar a representação do conversor em cada um dos estágios supracitados, respectivamente.

Quando a chave  $Sw$  encontra-se fechada, a fonte de tensão fornece energia ao indutor do estágio de entrada  $L_1$ , enquanto que o indutor do estágio de saída  $L_2$  é alimentado pelo capacitor de acoplamento  $C_p$ . O diodo  $D_s$ , por sua vez, está reversamente polarizado.

Quando a chave  $Sw$  encontra-se aberta, o diodo está diretamente polarizado e os capacitores  $C_p$  e  $C_o$  recebem a energia que deve ser fornecida a  $L_2$  e à carga, respectivamente, quando do fechamento da chave.

### 5.3 Determinação das Tensões

No estágio em que a chave está fechada, o indutor  $L_1$  encontra-se paralelo à fonte de tensão, portanto:

$$v_{L_1}(on) = V_s \quad (5.1)$$

Aplicando-se a LKT em torno da malha que contém  $V_s$ ,  $L_1$ ,  $C_p$  e  $L_2$ , resulta em:

$$-V_s + v_{L_1}(on) + v_{C_p}(on) - v_{L_2}(on) = 0 \quad (5.2)$$

Assumindo os valores médios das grandezas e sendo nulas as tensões médias nos indutores:

$$-V_s + V_{L_1} + V_{C_p} - V_{L_2} = 0 \quad (5.3)$$

$$V_{C_p} = V_s \quad (5.4)$$

O capacitor  $C_p$  e o indutor  $L_2$  encontram-se em paralelo, compartilhando, portanto, da mesma tensão. Tem-se:

$$V_{C_p} = V_{L_2} \quad (5.5)$$

Considerando que  $V_{C_p}$  é constante e igual a  $V_s$ , resulta:

$$V_{L_2} = V_s \quad (5.6)$$

No estágio em que a chave está aberta, pode-se aplicar a LKT à malha mais externa, resultando no seguinte:

$$-V_s + v_{L_1}(off) + v_{C_p}(off) + V_o = 0 \quad (5.7)$$

Considerando que a tensão no capacitor de acoplamento é constante, ou seja, igual a  $V_{C_p}$ , tem-se:

$$-V_s + v_{L_1}(off) + V_{C_p} + V_o = 0 \quad (5.8)$$

Substituindo a equação em que  $V_{C_p}$  é igual a  $V_s$ :

$$-V_s + v_{L_1}(off) + V_s + V_o = 0 \quad (5.9)$$

$$v_{L_1}(off) = -V_o \quad (5.10)$$

## 5.4 Determinação do Ciclo de Trabalho

O ciclo de trabalho do conversor pode ser determinado a partir do cálculo do valor médio da tensão sobre o indutor  $L_1$ :

$$V_{L_1} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{L_1}(t) dt = 0 \quad (5.11)$$

$$v_{L_1}(on)DT + v_{L_1}(off)(1-D)T = 0 \quad (5.12)$$

$$V_s D - V_o(1-D) = 0 \quad (5.13)$$

$$D = \frac{V_o}{V_s + V_o} \quad (5.14)$$

A partir desta equação, obtém-se a tensão de saída:

$$V_o = V_s \frac{D}{1-D} \quad (5.15)$$

## 5.5 Determinação das Correntes

### 5.5.1 Corrente no Indutor 1

Assumindo máxima eficiência do conversor, a potência da fonte é entregue à carga em sua totalidade. Tem-se que:

$$P_o = V_o I_o \quad (5.16)$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_{L_1} \quad (5.17)$$

Igualando as duas equações,

$$V_s I_{L_1} = V_o I_o \quad (5.18)$$

$$I_{L_1} = \frac{V_o I_o}{V_s} \quad (5.19)$$

Substituindo a equação de  $V_o$ , encontra-se a corrente do indutor  $L_1$  em função do ciclo de trabalho da chave:

$$I_{L_1} = I_o \frac{D}{1-D} \quad (5.20)$$

### 5.5.2 Corrente no Indutor 2

A obtenção da equação da corrente no indutor  $L_2$  se dá por meio da aplicação da LKC no nó que conecta  $C_p$ ,  $L_2$  e o diodo, no estágio em que a chave se encontra aberta. Temos, portanto, duas equações:

$$i_{L_2}(off) = i_{D_s} - i_{C_p}(off) \quad (5.21)$$

e

$$i_{D_s} = i_{C_o}(off) + I_o \quad (5.22)$$

Substituindo a segunda equação na primeira:

$$i_{L_2}(off) = i_{C_o}(off) + I_o + i_{C_p}(off) \quad (5.23)$$

Assumindo os valores médios nas correntes dos capacitores e sendo estas nulas, obtém-se:

$$i_{L_2}(off) = I_o \quad (5.24)$$

### 5.5.3 Corrente no Diodo

Para operação com a chave fechada, combinando-se as duas equações 5.22 e 5.24, resulta:

$$i_{D_s}(on) = i_{C_o} + i_{L_2} \quad (5.25)$$

Para operação com a chave aberta, temos:

$$i_{D_s}(off) = 0 \quad (5.26)$$

### 5.5.4 Corrente na Chave

Para operação com a chave fechada, aplicamos a LKC no nó que conecta  $L_1$  e  $C_p$  à chave:

$$i_{L_1}(on) + i_{L_2}(on) = i_{Sw}(on) \quad (5.27)$$

Para operação com a chave aberta, temos:

$$i_{Sw}(off) = 0 \quad (5.28)$$

### 5.5.5 Corrente no Capacitor de Acoplamento

Para operação com a chave fechada, a corrente no capacitor de acoplamento é oposta à corrente no indutor  $L_2$ , portanto:

$$i_{C_p}(on) = -i_{L_2}(on) \quad (5.29)$$

Para operação com a chave aberta, a corrente no capacitor de acoplamento é a mesma no indutor  $L_1$ :

$$i_{C_p}(off) = i_{L_1}(off) \quad (5.30)$$

### 5.5.6 Corrente no Capacitor de Saída

Para operação com a chave fechada, a corrente no capacitor de saída é oposta à corrente na carga, portanto:

$$i_{C_o}(on) = -I_o \quad (5.31)$$

Para operação com a chave aberta, a corrente no capacitor de saída pode ser obtida por meio da aplicação da LKC no nó que conecta  $C_p$ ,  $L_2$  e o diodo. A equação 5.23 é o resultado desta análise. Combinada à equação 5.30, resulta:

$$i_{C_o}(off) = i_{L_1}(off) + i_{L_2}(off) - I_o \quad (5.32)$$

A Figura 9 ilustra o comportamento de todas as correntes que foram determinadas.

## 5.6 Determinação dos Elementos Reativos

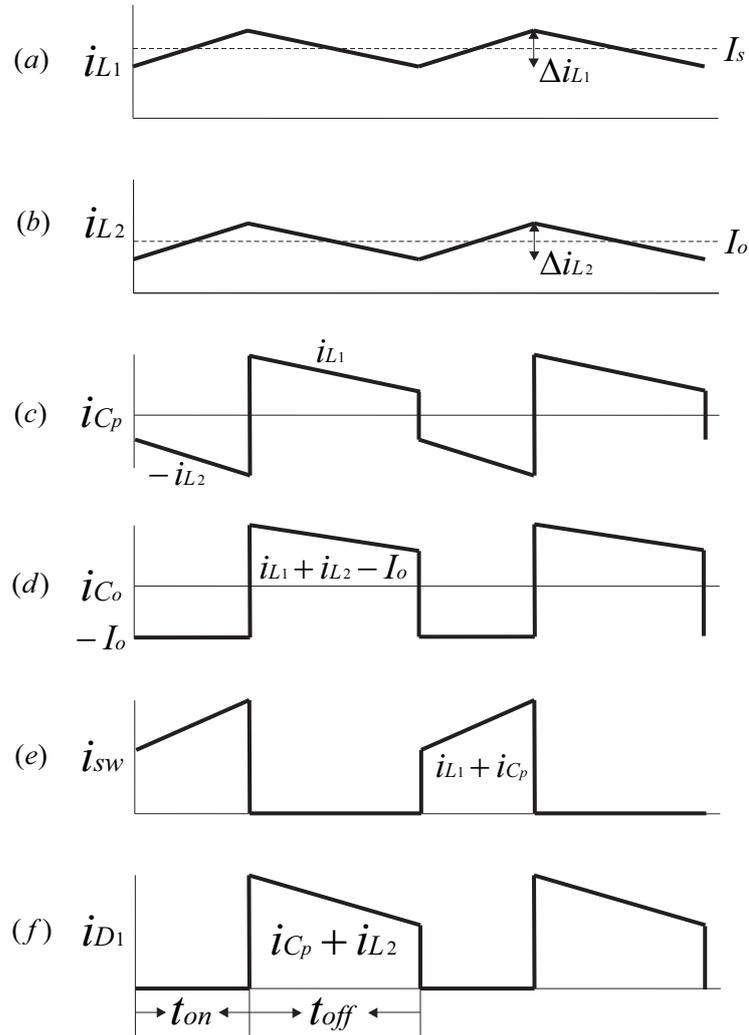
Um dos primeiros passos ao projetar uma fonte chaveada é definir quanto as correntes nos indutores e tensões sobre os capacitores podem variar. Variações muito altas nas correntes dos indutores, por exemplo, acarretam aumento da interferência eletromagnética nos demais componentes e na própria carga, afetando o desempenho do conversor. O ideal é que esta variação não seja maior que 40%. (FALIN, 2008) A partir da definição deste critério, os elementos reativos podem ser determinados, como será detalhado a seguir.

### 5.6.1 Determinação da Indutância de Entrada

A variação da corrente do indutor de entrada pode ser encontrada considerando-se a operação com a chave fechada. Tem-se:

$$v_{L_1} = V_s = L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = L_1 \frac{\Delta i_{L_1}}{DT} \quad (5.33)$$

Figura 9 – Formas de onda das correntes no SEPIC: (a) Indutor 1; (b) Indutor 2; (c) Capacitor de acoplamento; (d) Capacitor de saída; (e) Chave; (f) Diodo



Fonte: (HART, 2012)

Portanto, a indutância mínima de entrada para garantir um bom funcionamento do conversor é dada por:

$$L_{1min} = \frac{V_s D}{\Delta i_{L1} f_{Sw}} \quad (5.34)$$

### 5.6.2 Determinação da Indutância de Saída

A variação na corrente do indutor de saída pode ser encontrada considerando-se a operação com a chave fechada. Similarmente à demonstração realizada com o indutor  $L_1$ , tem-se:

$$v_{L2} = V_s = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{DT} \quad (5.35)$$

Portanto, a indutância mínima de saída para garantir um bom funcionamento do

conversor é dada por:

$$L_{2min} = \frac{V_s D}{\Delta i_{L_2} f_{sw}} \quad (5.36)$$

### 5.6.3 Determinação da capacitância de acoplamento

A variação na tensão do capacitor de acoplamento pode ser encontrada considerando-se a operação com a chave fechada. Tem-se:

$$\Delta V_{C_p} = \frac{I_{C_p} DT}{C_p} = \frac{I_{C_p} D}{f_{sw} C_p} \quad (5.37)$$

Como já determinado anteriormente, neste estágio de operação, a corrente em  $C_p$  é oposta à corrente em  $L_2$ , cujo valor médio é  $I_o$ , resultando em:

$$\Delta V_{C_p} = \frac{I_o D}{f_{sw} C_p} = \frac{V_o D}{R f_{sw} C_p} \quad (5.38)$$

Portanto, a capacitância mínima de acoplamento para garantir um bom funcionamento do conversor é dada por:

$$C_p = \frac{D V_o}{R \Delta V_{C_p} f_{sw}} \quad (5.39)$$

### 5.6.4 Determinação da Capacitância de Saída

A variação na tensão do capacitor de saída pode ser encontrada considerando-se a operação com a chave fechada. Tem-se:

$$\Delta V_{C_o} = \frac{I_{C_o} DT}{C_o} = \frac{I_{C_o} D}{f_{sw} C_o} \quad (5.40)$$

Neste estágio de operação, a corrente média em  $C_o$ , em módulo, é a mesma da carga. Portanto:

$$\Delta V_{C_o} = \frac{I_o DT}{C_o} = \frac{I_o D}{f_{sw} C_o} \quad (5.41)$$

Assim, a capacitância mínima de saída para garantir um bom funcionamento do conversor é dada por:

$$C_o = \frac{D V_o}{R \Delta V_{C_o} f_{sw}} \quad (5.42)$$

## 5.7 Determinação dos Componentes Ativos

### 5.7.1 Seleção da Chave Condutora

O *MOSFET* de potência deve ser cuidadosamente escolhido, pois ele deve suportar a tensão e correntes de pico ao passo que minimiza as perdas por dissipação de potência.

A corrente desse componente irá determinar a corrente máxima de saída do conversor *SEPIC*. (FALIN, 2008)

A tensão de pico sobre o transistor é calculada considerando-se a operação com a chave aberta e aplicando-se a LKT na malha que contém a chave e os capacitores, o que resulta em:

$$-V_{Sw} + v_{C_p} + V_o = 0 \quad (5.43)$$

Considerando o valor médio da tensão sobre  $C_p$ , tem-se:

$$-V_{Sw} + V_s + V_o = 0 \quad (5.44)$$

Portanto,

$$V_{Sw} = V_s + V_o \quad (5.45)$$

A corrente de pico é calculada considerando-se a operação com a chave fechada e aplicando-se a LKC ao nó que une o indutor  $L_1$ , o capacitor  $C_p$  e a chave, o que resulta em:

$$I_{Sw}(pico) = I_{L_1}(pico) + I_{L_2}(pico) \quad (5.46)$$

As correntes de pico nos indutores, por sua vez, são calculadas da seguinte forma:

$$I_{L_1}(pico) = I_{L_1} + \frac{\Delta i_{L_1}}{2} \quad (5.47)$$

$$I_{L_2}(pico) = I_{L_2} + \frac{\Delta i_{L_2}}{2} \quad (5.48)$$

Outro parâmetro relevante é a capacidade que o dispositivo tem de dissipar calor. À temperatura ambiente, a potência dissipada deve ser maior que a soma das perdas por condução (uma função do parâmetro  $r_{DS(on)}$ , correspondente à resistência da chave quando ligada) e das perdas por chaveamento (uma função da carga na porta), para que não seja necessário acoplar um dissipador de calor à chave. A equação 5.49 detalha como calcular a potência dissipada pelo *MOSFET*.

$$P_{Sw} = I_{Sw}^2(RMS) \times r_{DS(on)} \times D_s + I_{Sw}(pico) \times V_{Sw} \times \frac{t_{Rise} + t_{Fall}}{2} \times f_{Sw} \quad (5.49)$$

$t_{Rise}$  representa o tempo de subida da porta de Sw, enquanto que  $t_{Fall}$  representa o tempo de descida. A corrente *RMS* na chave, por sua vez, é dada por:

$$I_{Sw}(RMS) = \frac{I_{L_1}}{\sqrt{D}} \quad (5.50)$$

### 5.7.2 Seleção do Diodo

O diodo deve ser capaz de suportar a mesma corrente de pico do transistor, bem como uma tensão reversa superior a tensão máxima suportada pelo *MOSFET*. A tensão reversa deve ser calculada considerando-se a operação com a chave fechada, conforme a seguinte equação:

$$V_{D_s}(rev) = V_o - (-v_{L_2}) \quad (5.51)$$

Utilizando o valor médio de  $v_{L_2}$ , resulta em:

$$V_{D_s}(rev) = V_o + V_s \quad (5.52)$$

Por fim, tendo em vista que a corrente média no diodo é a mesma da corrente média de saída, o diodo deve ter condições de dissipar:

$$P_{D_s} = I_o + V_{D_s} \quad (5.53)$$

$V_{D_s}$  representa a tensão direta do dispositivo, considerando-o como um elemento não-ideal, visto que apresenta uma resistência, mesmo que pequena, quando no estágio de condução.

## 5.8 Dimensionamento do Conversor

A Tabela 3 mostra os parâmetros conhecidos do projeto do conversor, a partir dos quais os componentes serão selecionados. Os cálculos das indutâncias mínimas foram realizados admitindo-se uma variação máxima nas correntes em cada indutor de 40%. Portanto,

$$\Delta I_L = 40\% I_L \quad (5.54)$$

Tabela 3 – Especificações de projeto

Parâmetro	Valor
$V_s$ (V)	12
$V_o$ (V)	29
$I_o$ (A)	6
$f_{sw}$ (kHz)	100
$V_{C_p}$ (V)	12
$\Delta V_{C_o}$ (%)	5,5

Fonte: a própria autora

A Tabela 4 mostra os cálculos realizados e os componentes selecionados.

Tabela 4 – Cálculo dos demais parâmetros do conversor SEPIC

Equação	Resultado	Componente selecionado
5.14	$D = 0,71$	
5.19	$I_{L_1} = 14,50A$	
5.54	$\Delta I_{L_1}(max) = 5,80A$	
5.54	$\Delta I_{L_2}(max) = 2,40A$	
5.47	$I_{L_1}(pico) = 15,95A$	
5.47	$I_{L_2}(pico) = 6,60A$	
5.34	$L_{1min} = 29,3\mu H$	$94\mu H$ ; toroidal; $100kHz$ ; 34A
5.36	$L_{2min} = 70,7\mu H$	$94\mu H$ ; toroidal; $100kHz$ ; 20A
5.39	$C_{pmin} = 64,3\mu F$	$8 \times 10\mu F$ em paralelo; SMD cerâmico
5.42	$C_{omin} = 27,0\mu F$	$4 \times 10\mu F$ em paralelo; SMD cerâmico
5.45	$V_{Sw} = V_{D_s}(rev) = 41V$	<i>MOSFET</i> IRFP150
5.46	$I_{Sw}(pico) = I_{D_s}(pico) = 23A$	Diodo <i>Schottky</i> STTH20R04
5.49	$P_{Sw} = 21,21W$	

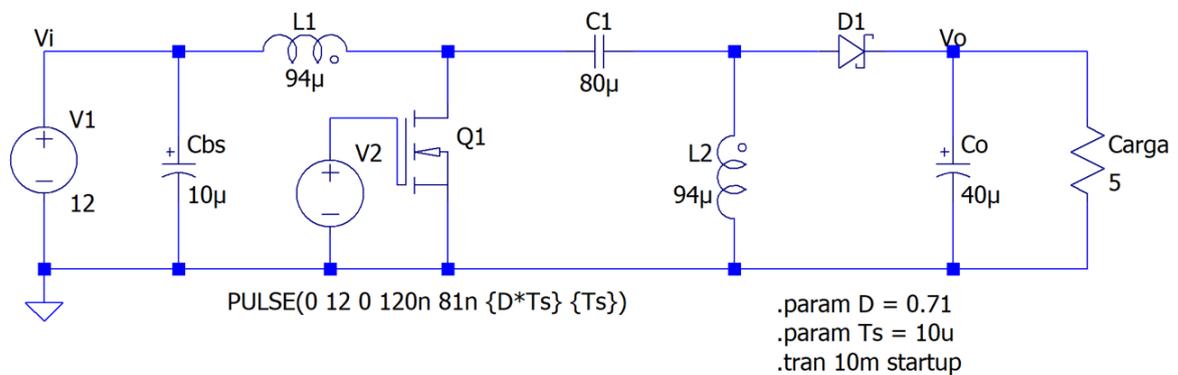
Fonte: a própria autora

## 6 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR CC-CC SEPIC

### 6.1 Simulação em Malha Aberta

Para simulação, foi utilizado o software LTspice XVII. A Figura 10 ilustra o esquemático do circuito:

Figura 10 – Esquemático do conversor SEPIC no ambiente de simulação



Fonte: própria autora

As seguintes respostas foram obtidas:

#### 6.1.1 Corrente no Indutor 1

##### 6.1.1.1 Variação da Corrente no Indutor 1

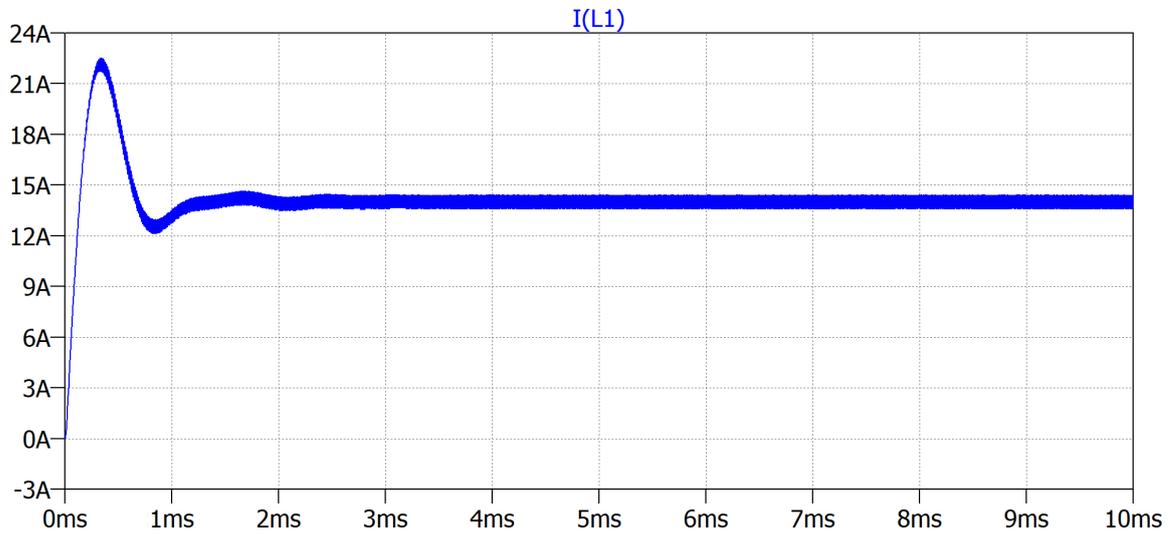
A Figura 12 mostra a variação na corrente do indutor  $L_1$ , cujo valor foi 834,31mA, de ordem bem inferior ao valor máximo admitido de  $14,5 \times 40\% = 5,80A$ . Sendo assim, conclui-se que é coerente utilizar o indutor escolhido.

#### 6.1.2 Corrente no Indutor 2

##### 6.1.2.1 Variação da Corrente no Indutor 2

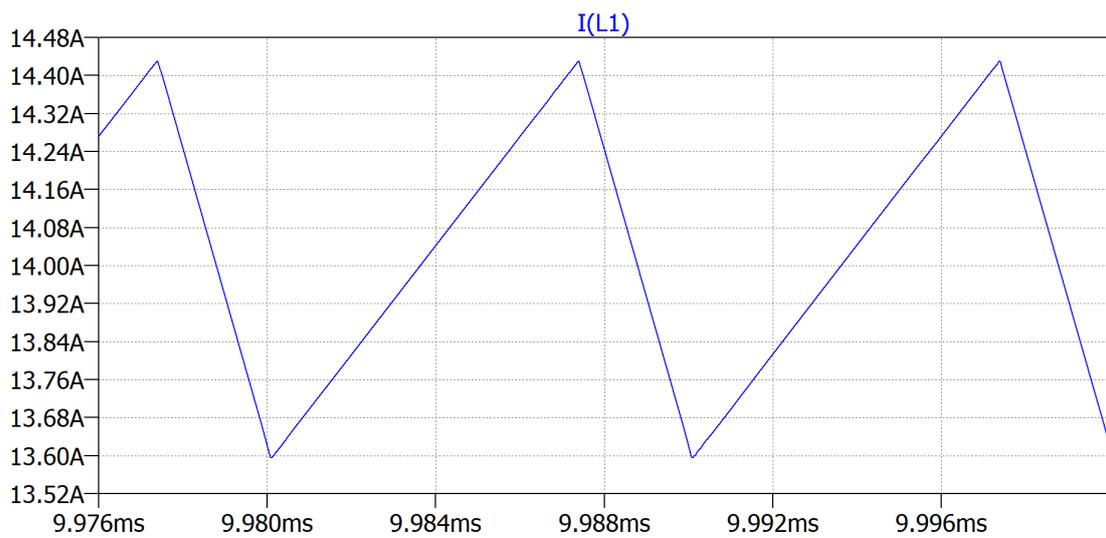
A Figura 14 mostra a variação na corrente do indutor  $L_2$ , cujo valor foi 749,17mA, de ordem bem inferior ao valor máximo admitido de  $6,0 \times 40\% = 2,40A$ . Sendo assim,

Figura 11 – Corrente no indutor 1



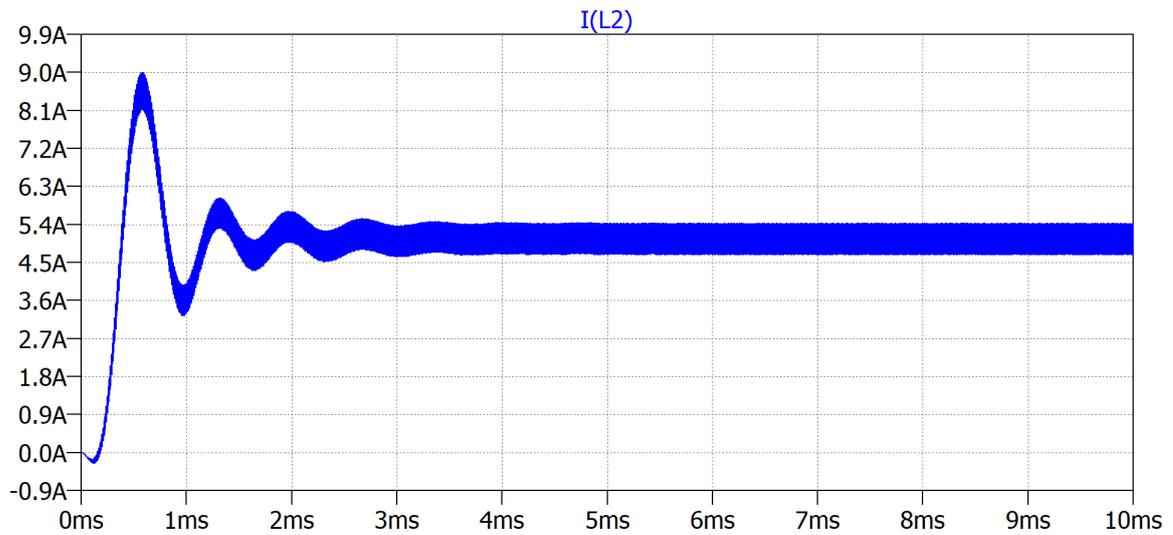
Fonte: a própria autora

Figura 12 – Variação da corrente no indutor 1



Fonte: a própria autora

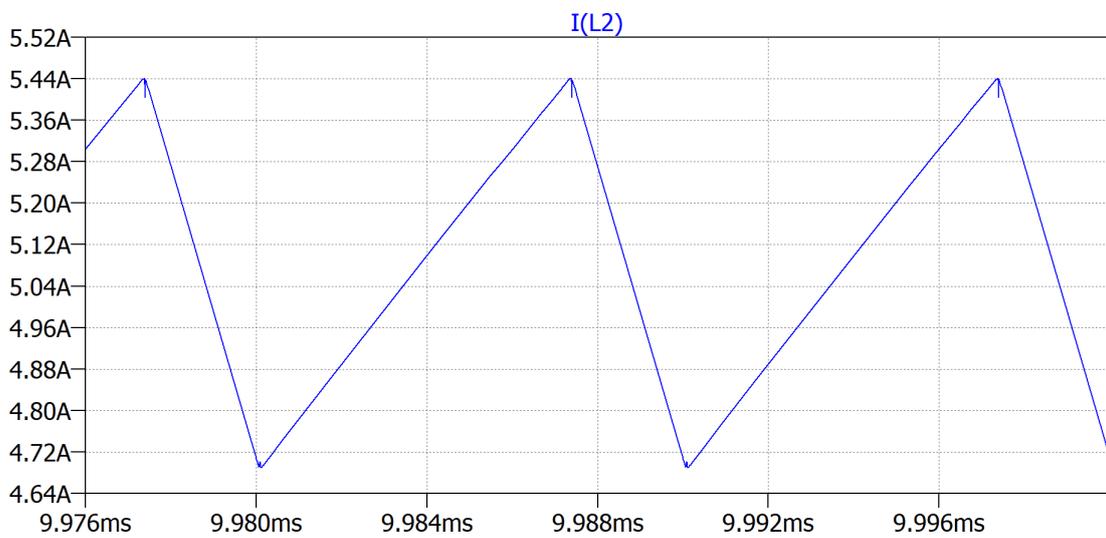
Figura 13 – Corrente no indutor 2



Fonte: a própria autora

conclui-se que é coerente utilizar o indutor escolhido.

Figura 14 – Variação da corrente no indutor 2



Fonte: a própria autora

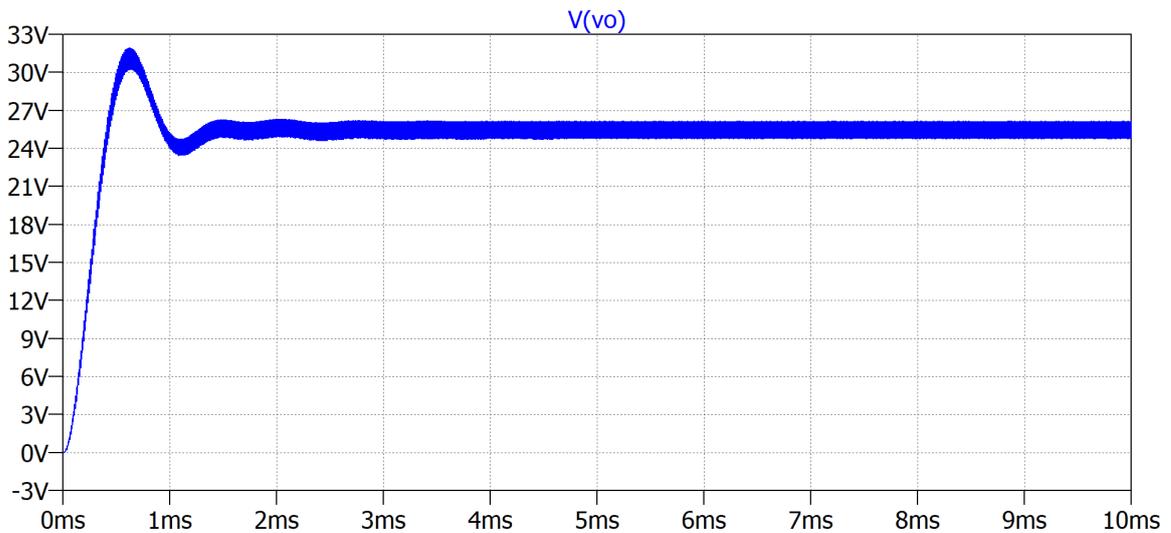
### 6.1.3 Resposta na Saída do Conversor

#### 6.1.3.1 Tensão na Saída do Conversor

##### 6.1.3.1.1 Variação da Tensão na Saída do Conversor

A Figura 16 ilustra a variação na tensão de saída, cujo valor foi 1,45V, inferior ao valor máximo admitido de  $29 \times 5,5\% = 1,60V$ . Sendo assim, conclui-se que é coerente

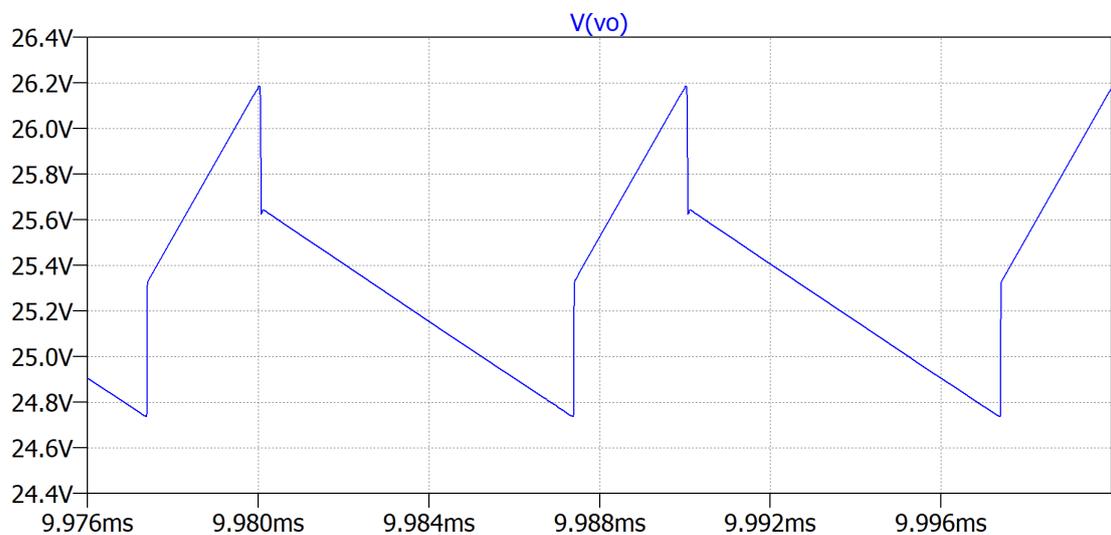
Figura 15 – Tensão na saída do conversor



Fonte: a própria autora

utilizar o capacitor de saída escolhido.

Figura 16 – Variação da tensão na saída do conversor

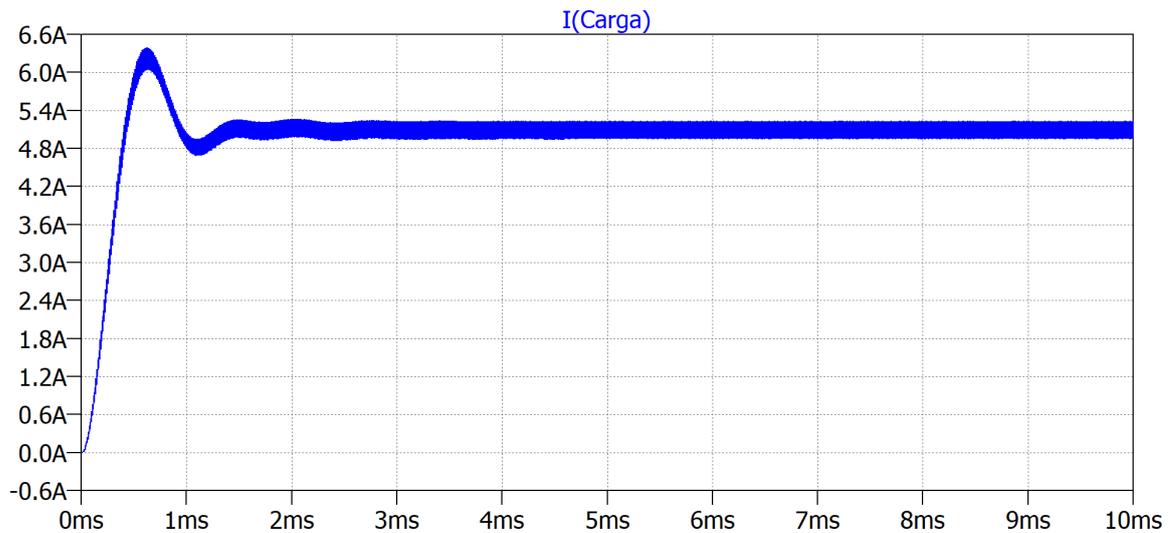


Fonte: a própria autora

### 6.1.3.2 Corrente na Saída do Conversor

Um outro aspecto que merece atenção é o valor médio da tensão e da corrente de saída do conversor, visto que são parâmetros importantes para que os módulos Peltier operem como desejado, mantendo o líquido refrigerado a 5°C assim como uma diferença de temperatura entre as faces quente e fria de 20°C.

Figura 17 – Corrente na saída do conversor



Fonte: a própria autora

É possível concluir, todavia, simplesmente ao se observar a figura 15 e a figura 17, que os valores médios da tensão e corrente de saída não alcançam os esperados de 29V e 6A, respectivamente.

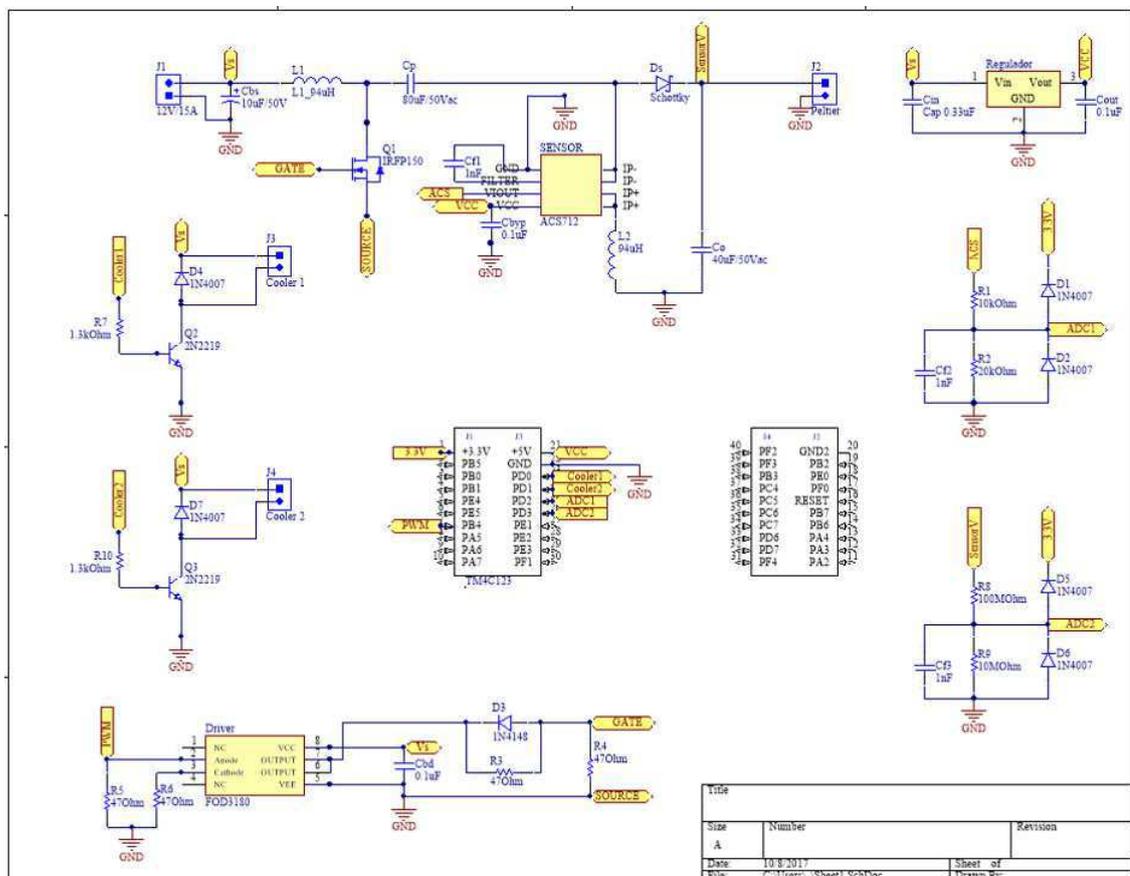
Tais discrepâncias de valores são esperadas no que diz respeito ao funcionamento de qualquer conversor, pois as perdas por condução e chaveamento naturalmente reduzem a eficiência do circuito. Uma solução para o problema é realizar o controle destas variáveis. Para que isso seja possível, é imprescindível que um sistema de controle “tome conhecimento” dos valores destas grandezas. O projeto da PCI leva isto em consideração.

# 7 PROJETO DA PCI DO CONVERSOR CC-CC SEPIC

Este capítulo traz, em detalhes, o projeto da PCI do conversor *SEPIC*. Para tal, fez-se uso do *software* Altium. Além de todos os componentes mencionados previamente, o projeto da placa conta com a inclusão da plataforma de prototipagem eletrônica *TM4C123G LaunchPad* - fabricada pela *Texas Instruments*, baseada na arquitetura *ARM Cortex-M4F* - e de sensores de tensão e corrente. A presença de tais componentes deixa evidente a intenção de se implementar o controle das variáveis de tensão e corrente na saída do conversor, pois, como mencionado no Capítulo 6, estas variáveis não atingem os valores esperados, sendo, portanto, o objetivo mantê-las constantes nos valores pré-estabelecidos.

## 7.1 Esquemático

Figura 18 – Esquemático completo do conversor SEPIC

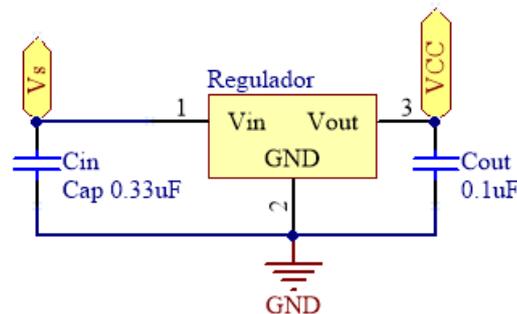


Fonte: a própria autora

### 7.1.1 Regulador de Tensão

Escolheu-se o regulador de tensão L7805CV para a aplicação. Seu circuito, mostrado na Figura 19, está em conformidade com o circuito de aplicação sugerido pelo fabricante. A tensão de entrada  $V_s$  é a fornecida pela bateria do veículo e a tensão  $V_{CC}$  é regulada em 5V. Este sinal tem como finalidade alimentar o microcontrolador.

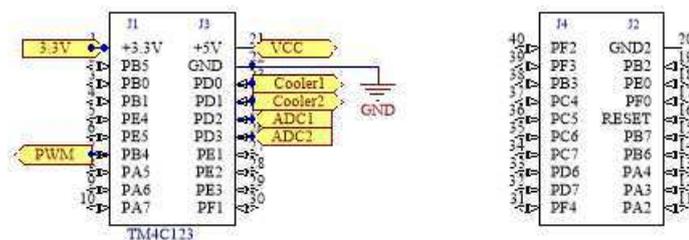
Figura 19 – Esquema do Regulador de Tensão L7805CV



Fonte: a própria autora

### 7.1.2 Microcontrolador

Figura 20 – Microcontrolador



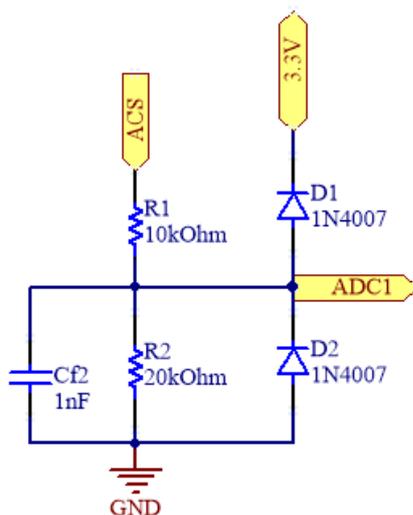
Fonte: a própria autora

### 7.1.3 Conversor SEPIC

Na imagem, representativa do conversor *SEPIC*, é possível notar a presença do circuito integrado ACS712 em série com o indutor do estágio de saída. Este CI é um sensor de efeito Hall, cuja função é o sensoriamento da corrente de saída do conversor. Resumindo seu funcionamento, o valor de corrente é convertido em tensão, que deve ser lido pelo microcontrolador. Também é possível notar a presença da porta denominada SensorV, conectada à saída. Sua finalidade é medir a tensão de saída, que também será lida pelo microcontrolador.

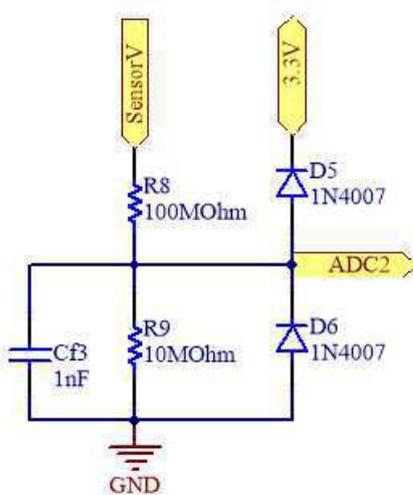


Figura 22 – Condicionamento da saída do sensor de corrente



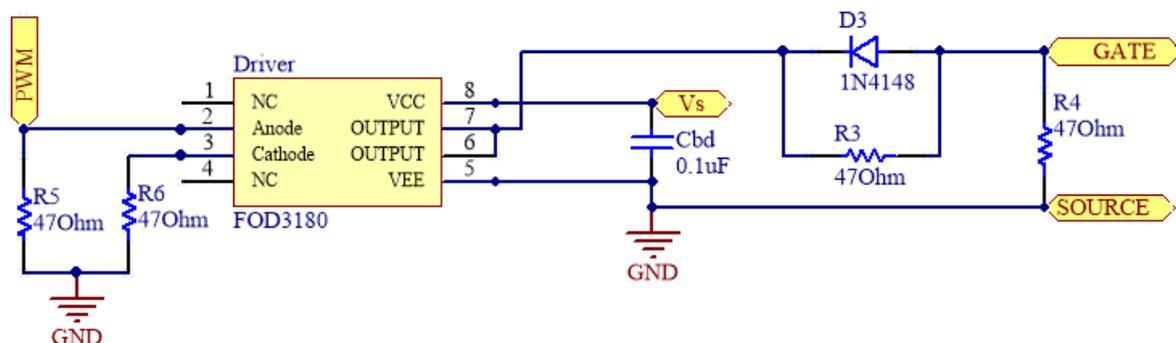
Fonte: a própria autora

Figura 23 – Condicionamento da saída do sensor de tensão



Fonte: a própria autora

Figura 24 – Circuito Driver



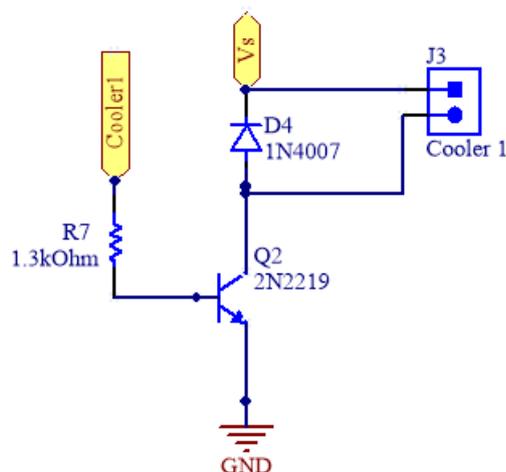
Fonte: a própria autora

aplicados ao controle de motores e de conversores CC-CC de alta frequência. O componente escolhido foi o CI FOD3180, fabricado pela *Fairchild Semiconductor*.

O condicionamento é importante, pois o sinal *PWM* gerado pela placa não é suficiente para chavear o transistor, em termos de amplitude. Utilizando-se o *driver*, o sinal *PWM* tem um ganho em amplitude, que passa de 3,3V para  $V_{CC} - V_{EE}$ , ou seja, 12V. Quanto a proteção, ela se dá pelo fato de este ser um dispositivo com acoplamento óptico, ou seja, não há uma conexão elétrica entre o circuito de comando e o circuito de força.

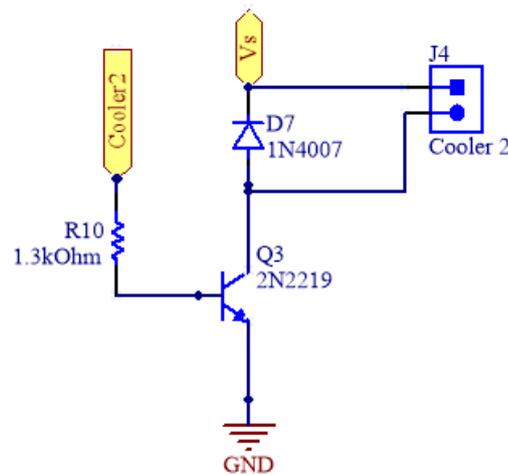
### 7.1.6 Circuitos para Acionamento dos Coolers

Figura 25 – Circuito para acionamento do cooler 1



Fonte: a própria autora

Figura 26 – Circuito para acionamento do cooler 2



Fonte: a própria autora

Seja  $I_C = 0,60A$ , corrente demandada pelos *coolers*, e  $h_{FE} = 300$ , tem-se:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 2mA \quad (7.3)$$

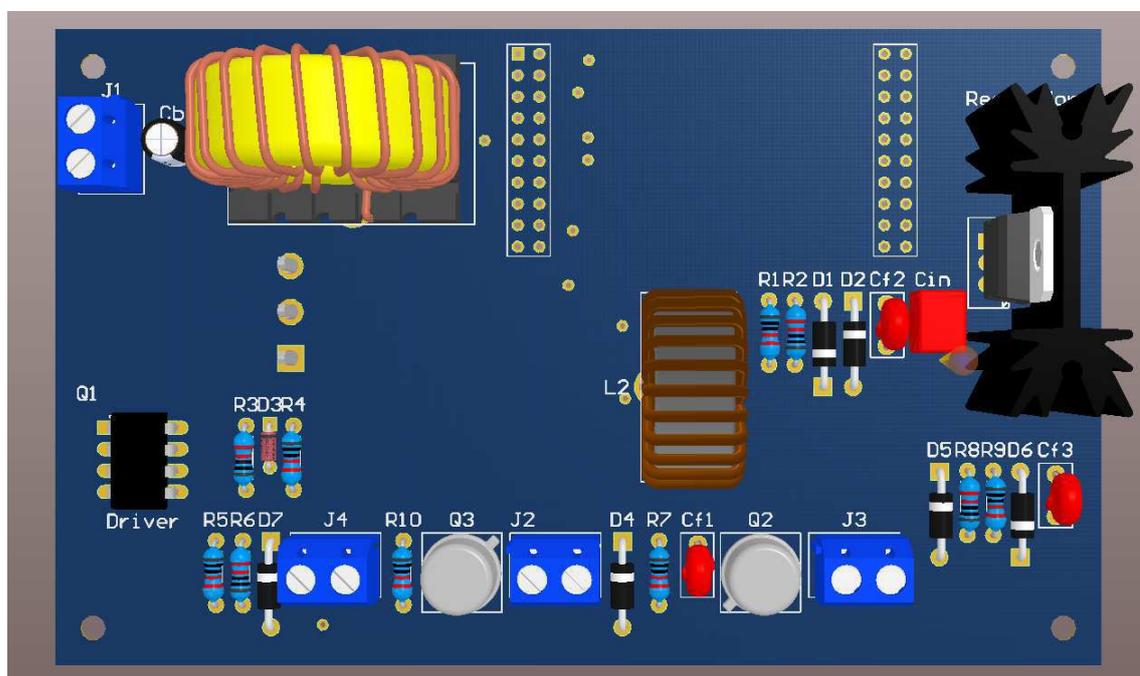
A resistência de base máxima necessária para polarizar o transistor é calculada da seguinte forma:

$$R_B = \frac{3,3 - V_{BE}}{I_B} = 1,3k\Omega \quad (7.4)$$

### 7.1.7 Placa de Circuito Impresso

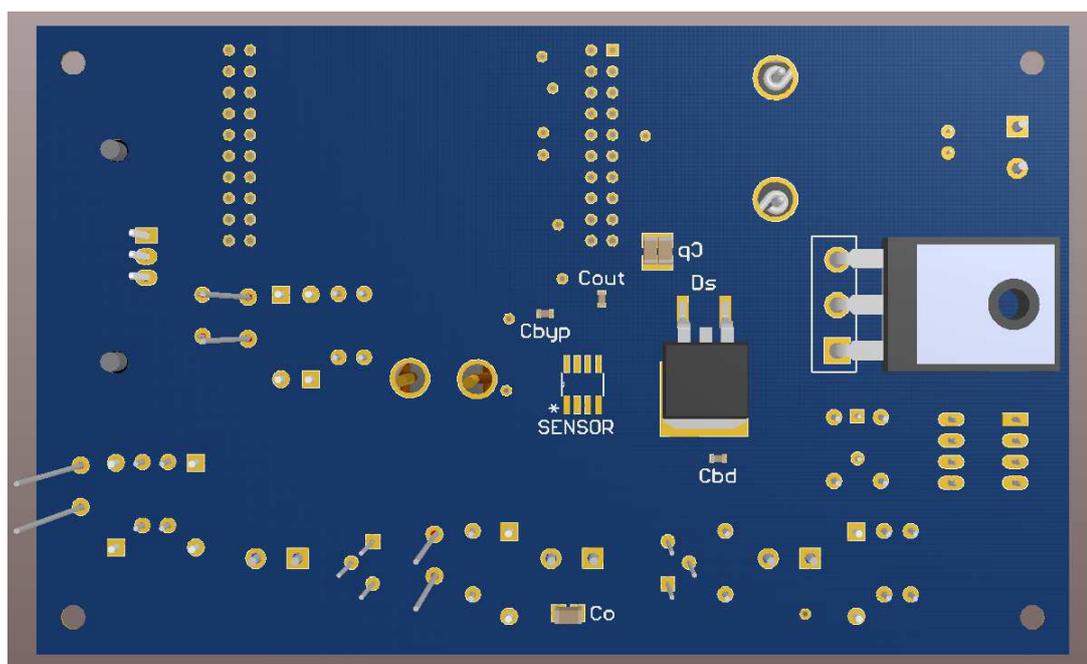
No PCI foram introduzidos modelos genéricos em 3D dos componentes, com exceção do microcontrolador, de modo a oferecer uma noção da dimensão do espaço ocupado por cada componente. As Figuras 27 e 28 trazem uma visão superior e inferior da placa, respectivamente, onde foram alocados os componentes do tipo *SMD*.

Figura 27 – Visão 3D superior da PCI



Fonte: a própria autora

Figura 28 – Visão 3D inferior da PCI



Fonte: a própria autora

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho trouxe uma abordagem breve sobre o princípio da termoeletricidade e sua relação com o módulo Peltier, dispositivo pensado como elemento refrigerador da aplicação proposta. Por conseguinte, mostrou-se como determinar a carga térmica do elemento a ser refrigerado, de modo a obter parâmetros iniciais de um conversor CC-CC.

Foram revisados, também, conceitos básicos dos conversores CC-CC chaveados, detalhando-se o conversor *SEPIC*, candidato apropriado para a aplicação. Por conseguinte, uma vez determinados os demais parâmetros do conversor, foram mostrados resultados de simulação em malha aberta, verificando-se a necessidade de implementação do controle em malha fechada. Por fim, mostrou-se o esquemático da PCI do *SEPIC*, detalhando-se cada um dos circuitos com os quais o conversor deve interagir.

Visto que montagem, testes e implementação do controle em malha fechada não foram ainda realizados, estes são os objetivos a serem alcançados a seguir.

# REFERÊNCIAS

FALIN, J. Designing dc/dc converters based on sepic topology. *Analog Applications Journal*, p. 18–23, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 24, 29 e 32.

HART, D. *Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: ARTMED Editora S.A. e McGraw-Hill Education, 2012. Citado na página 30.

LUO, F. *Digital Power Electronics and Applications*. [S.l.]: ELSEVIER, 2005. Citado na página 21.

MCKENZIE, J. The peltier effect. SRJC. Power Point presentation for the Engr45 unit. 2005. Citado na página 17.

MOHAN, N. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. [S.l.]: John Wiley & Sons, INC., 1995. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.