

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**KELLY CRISTINE BERNO  
STACY BARCELOS DE FRANCO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENERGIA AUTÔNOMO  
PARA APLICAÇÃO EM COMPUTAÇÃO MÓVEL UTILIZANDO  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2015**

**KELLY CRISTINE BERNO  
STACY BARCELOS DE FRANCO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENERGIA AUTÔNOMO  
PARA APLICAÇÃO EM COMPUTAÇÃO MÓVEL UTILIZANDO  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Roger Gules

**CURITIBA**

**2015**

Kelly Cristine Berno  
Stacy Barcelos de Franco

## Desenvolvimento de um sistema de energia autônomo para aplicação em computação móvel utilizando módulos fotovoltaicos

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 26 de fevereiro de 2015.

---

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.  
Coordenador de Curso  
Engenharia de Controle e Automação

---

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Prof. Roger Gules, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Roger Gules, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Alceu André Badin, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, que guiou e orientou nosso caminho e nos deu força para continuarmos nele. Com Ele nós conseguimos ultrapassar obstáculos, vencer desafios e obter grandes realizações.

Aos nossos familiares somos muito gratas por sempre nos apoiarem em nossas decisões, por nos darem condições e nos incentivarem a estudar e ter uma formação.

Aos nossos amigos que estiveram sempre presentes nessa jornada, que nos auxiliaram nos momentos difíceis e na compreensão demonstrada pela nossa ausência nos momentos de descontração.

Também agradecemos aos professores que inspiraram a trabalharmos melhor, a estudarmos e aprendermos mais, e a nos tornarmos pessoas melhores. Em especial agradecemos ao nosso orientador, Prof. Dr. Roger Gules, primeiramente pela confiança depositada em nós para a realização de um projeto de sua idealização. Também pelo grande auxílio na elaboração deste trabalho, sanando nossas dúvidas, cedendo o laboratório B207 da UTFPR para o desenvolvimento deste projeto, e pela paciência mostrada a nós.

“Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares.”

**Josué 1:9**

## RESUMO

BERNO, Kelly; FRANCO, Stacy. **Desenvolvimento de um sistema de energia autônomo para aplicação em computação móvel utilizando módulos fotovoltaicos.** 2015. 93 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um conversor CC-CC *three-port* para geração de energia autônoma através de módulo fotovoltaico, visando o aumento da autonomia de um computador portátil. É apresentado um estudo sobre o tema e sobre a escolha do conversor, a simulação do funcionamento do mesmo, além da apresentação do projeto, da construção do protótipo e da análise dos resultados obtidos. O conversor obtido é baseado na utilização de um módulo fotovoltaico com a tensão de máxima potência de aproximadamente 15 V, uma bateria de 12 V, e alimenta um computador portátil de 19 V e 2,5 A. O funcionamento do conversor se mostrou adequado, porém o rendimento do mesmo ficou próximo de 80 %, um pouco abaixo do esperado.

**Palavras-chave:** Fotovoltaico. Conversor. *Three-port*. Meia-ponte. Cuk.

## ABSTRACT

BERNO, Kelly; FRANCO, Stacy. **Development of a stand-alone power system for mobile computing application using photovoltaic modules**. 2015. 93 pages. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2015.

This paper presents the development of a three-port DC-DC converter for stand-alone power generation through photovoltaic module in order to increase the autonomy of a mobile computer. Presented in it are a study of the subject and the choice of the converter, the simulation of its operation, and the presentation of the project, the prototype construction design, and the analysis of results. The converter obtained is based on the use of a PV module with voltage at maximum power of about 15V, a 12V battery and feeds a laptop with 19 V and 2.5 A. The operation of the converter was adequate; however, the efficiency of the same was close to 80%, slightly lower than expected.

**Keywords:** Photovoltaic. Converter. Three-port. Half-bridge. Cuk.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjo dos elementos do projeto .....	17
Figura 2 - Curva característica V ou IxP.....	25
Figura 3 - Arquitetura de alimentação para notebook .....	26
Figura 4 - Arquiteturas com um único conversor.....	27
Figura 5 - Arquiteturas com dois conversores .....	27
Figura 6 - Arquitetura conversor multiportas .....	28
Figura 7 - Topologia ponte completa <i>three-port</i> .....	30
Figura 8 - Topologia <i>three-port</i> isolada .....	31
Figura 9 - Topologia Cuk <i>multiple-input</i> .....	32
Figura 10 - Topologia Cuk <i>three-port</i> .....	33
Figura 11 - Topologia proposta 1 .....	33
Figura 12 - Topologia proposta 2 .....	34
Figura 13 - Etapas de funcionamento do conversor Cuk bidirecional .....	35
Figura 14 - Formas de onda do conversor Cuk bidirecional.....	36
Figura 15 - Arquitetura do conversor meia-ponte .....	38
Figura 16 - Etapa 1 do conversor meia-ponte .....	40
Figura 17 - Etapa 2 do conversor meia-ponte .....	40
Figura 18 - Etapa 3 do conversor meia-ponte .....	41
Figura 19 - Etapa 4 do conversor meia-ponte .....	41
Figura 20 - Etapa 5 do conversor meia-ponte .....	42
Figura 21 - Etapa 6 do conversor meia-ponte .....	42
Figura 22 - Etapa 7 do conversor meia-ponte .....	43
Figura 23 - Etapa 8 do conversor meia-ponte .....	43
Figura 24 - Etapa 9 do conversor meia-ponte .....	44
Figura 25 - Etapa 10 do conversor meia-ponte .....	44
Figura 26 - Formas de onda do conversor meia-ponte .....	45
Figura 27 - Modo 1 de operação do conversor.....	46
Figura 28 - Modo 2 de operação do conversor.....	47
Figura 29 - Modo 3 de operação do conversor.....	47
Figura 30 - Modo 4 de operação do conversor.....	48
Figura 31 - Modo 5 de operação do conversor.....	49
Figura 32 - Funcionamento da topologia proposta .....	50
Figura 33 - Formas de onda do conversor .....	51
Figura 34 - Implementação da topologia proposta no software PSIM.....	53
Figura 35 - Simulação em modo de operação 5.....	54
Figura 36 - Simulação em modo de operação 4.....	54
Figura 37 - Simulação da transição do modo 4 para o 5.....	55
Figura 38 - Protótipo do conversor .....	56



Figura 39 - Estrutura do IRFZ48N .....	59
Figura 40 - Kit Tiva™ LaunchPad .....	60
Figura 41 - Driver de acionamento das chaves .....	61
Figura 42 - Diagrama de ligação do DRVHCPL(2R1) .....	62
Figura 43 - Divisor resistivo da saída .....	62
Figura 44 - Amplificador não inversor com filtro passa-baixa .....	63
Figura 45 - Estrutura do LM324N .....	64
Figura 46 - $V_1$ e $I_1$ (a), e $V_o$ e $I_o$ (b).....	65
Figura 47 - $V_{Tp}$ (a), e $V_{Ts}$ (b) .....	66
Figura 48 - $I_{Tp}$ (a), e $I_{Ts}$ (b).....	66
Figura 49 - $V_{C2}$ e $V_{C1}$ .....	67
Figura 50 - Tensão no anodo e no catodo de $D_{o1}$ .....	67
Figura 51 - PWM assimétrico .....	68
Figura 52 - $V_2$ e $I_2$ (a), e $V_o$ e $I_o$ (b).....	68
Figura 53 - $V_1$ e $I_1$ (a), e $V_2$ e $I_2$ (b).....	69
Figura 54 - $V_1$ e $I_1$ (a), $V_2$ e $I_2$ (b), e $V_o$ e $I_o$ (c).....	70
Figura 55 - $I_{L1}$ , e $I_{L2}$ .....	71
Figura 56 - $V_1$ e $I_1$ (a), $V_2$ e $I_2$ (b), e $V_o$ e $I_o$ (c).....	71
Figura 57 - $I_{L1}$ , e $I_{L2}$ .....	72
Figura 58 - Transição de modo de operação.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

$A_{17}$	Área da seção transversal do fio AWG 17
$A_e$	Área da seção transversal do núcleo
$A_{cu}$	Área do fio de cobre
$A_{is}$	Área do fio de cobre com isolante
$A_p$	Área de ocupação do enrolamento primário
$A_s$	Área de ocupação do enrolamento secundário
$A_w$	Área da janela do carretel do núcleo
$A_{wmin}$	Área mínima da janela do carretel do núcleo
$B_o$	Densidade de fluxo do transformador
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
$C_n$	Capacitor n
D	Razão cíclica
$D_n$	Diodo n
$f_s$	Frequência de chaveamento
$I_{cu}$	Corrente do fio de cobre
$I_{Dmax}$	Máxima corrente do coletor
$I_{(AV)}$	Máxima corrente retificada
$I_n$	Corrente em n
$I_{LdRMS}$	Corrente eficaz na indutância de dispersão do transformador
$I_{Ln}$	Corrente do indutor n
$I_{Lnef}$	Corrente eficaz no indutor n
$I_{Lnmax}$	Valor máximo de corrente n
$I_{Lnmed}$	Valor médio de corrente do indutor n
$I_n'$	Corrente n refletida no primário do transformador
$l_t$	Comprimento médio da espira
$I_{Tp}$	Corrente no primário do transformador
$I_{Ts}$	Corrente no secundário do transformador
$J_i$	Densidade de corrente dos indutores
$J_o$	Densidade de corrente do transformador
$K_p$	Fator de área do primário
$K_t$	Fator dependente do tipo de topologia

$K_u$	Fator de utilização de janelas
$K_v$	Fator de forma de onda (quadrada simétrica)
$K_w$	Fator para possibilidade de execução
$l_g$	Entreferro no núcleo “E”
$l_{caboLn}$	Comprimento do cabo do indutor n
$l_{caboP}$	Comprimento do cabo do primário do transformador
$l_{caboS}$	Comprimento do cabo do secundário do transformador
$L_{emed}$	Comprimento médio de uma espira
$L_n$	Indutor n
$L_r$	Indutor ressonante
MPP	<i>Maximum Power Point</i> – Ponto de máxima potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Traking</i> – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
N	Relação de transformação
$n_{Ln}$	Número de condutores no indutor n
$N_{Ln}$	Número de espiras no indutor n
$N_p$	Número de espiras no enrolamento primário
$N_s$	Número de espiras no enrolamento secundário
$P_o$	Potência de saída
$P_p$	Número de condutores em paralelo no enrolamento primário
$P_s$	Número de condutores em paralelo no enrolamento secundário
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação da largura de pulso
$R_{Ds(on)máx}$	Resistência <i>drain - source</i> ligado
$S_n$	Chave n
$T_p$	Primário do transformador
$T_s$	Secundário do transformador
$V_e$	Volume efetivo
$V_{Cn}$	Tensão no capacitor n
$V_{cnmáx}$	Valor máximo de tensão no capacitor n
$V_{DC}$	Tensão máxima de bloqueio CC
$V_{Dsmáx}$	Máxima tensão coletor-emissor
$V_n$	Tensão da fonte n
$V_n'$	Tensão n refletida no primário do transformador
$V_{omín}$	Tensão de saída mínima
$V_{RRM}$	Máxima tensão reversa

ZVS	Tensão nula no momento de comutação
$\Delta$	Raio do condutor efetivo devido ao efeito pelicular
$\Delta B_i$	Densidade de fluxo dos indutores
$\Delta I_n$	Varição de corrente em n
$\Delta V_n$	Varição de tensão em n
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar
$\Delta$	Entreferro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 TEMA .....	16
1.1.1 Delimitação do tema .....	16
1.2 PROBLEMA E PREMISSE .....	17
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Objetivo geral .....	18
1.3.2 Objetivos específicos .....	18
1.4 JUSTIFICATIVAS .....	18
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2 BASE TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
2.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA .....	21
2.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	22
2.3 BATERIA .....	22
2.4 CONTROLADOR DE CARGA .....	24
2.5 CARGA (SAÍDA DO SISTEMA) .....	25
2.6 TOPOLOGIA .....	26
2.7 CONTROLE PID .....	28
2.8 CONCLUSÃO .....	29
<b>3 TOPOLOGIA PROPOSTA</b> .....	<b>30</b>
3.1 TOPOLOGIAS PESQUISADAS .....	30
3.2 TOPOLOGIA PROPOSTA .....	32
3.3 TOPOLOGIAS DE EMBASAMENTO .....	34
3.3.1 Conversor Cuk bidirecional .....	34
3.3.2 Conversor meia-ponte ZVS com comando assimétrico .....	38
3.3.2.1 Etapas de funcionamento .....	39
3.3.2.2 Formas de onda .....	45
3.4 FORMAS DE OPERAÇÃO E CONTROLE, CONVERTOR SIMPLIFICADO .....	45
3.4.1 Modo 1: módulo fotovoltaico alimentando somente a carga .....	46
3.4.2 Modo 2: bateria alimentando a carga .....	46
3.4.3 Modo 3: sistema fotovoltaico alimentando a bateria .....	47
3.4.4 Modo 4: sistema fotovoltaico alimentando a carga e a bateria .....	48
3.4.5 Modo 5: módulo fotovoltaico e bateria alimentando a carga .....	48
3.5 FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA DO CONVERTOR PROPOSTO .....	49
3.6 CONCLUSÃO .....	52
<b>4 SIMULAÇÃO</b> .....	<b>53</b>
4.1 SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONVERTOR .....	53
4.2 CONCLUSÃO .....	55

<b>5 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>56</b>
5.1 COMPONENTES DO CIRCUITO DE POTÊNCIA .....	57
5.1.1 Dimensionamento dos indutores.....	58
5.1.2 Dimensionamento do transformador .....	58
5.1.3 Chaves de acionamento .....	58
5.1.4 Capacitores.....	59
5.2 COMPONENTES DO CIRCUITO DE CONTROLE.....	60
5.2.1 Microcontrolador .....	60
5.2.2 Driver de acionamento das chaves.....	61
5.2.3 Amplificadores e divisores de tensão.....	62
5.2.4 Filtros .....	64
5.3 CONCLUSÃO .....	64
<b>6 ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
6.1 CONCLUSÃO .....	73
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DOS INDUTORES E DO TRANSFORMADOR.....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE C – <i>FIRMWARE</i>.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia torna-se cada vez mais distante as fronteiras que nos cercam. Mas para que estas continuem avançando é preciso a realização de trabalhos e pesquisas, que em muitos casos se dão em lugares distantes e de difícil acesso. A evolução da bateria, de forma a possibilitar o aumento de sua duração (PARADISO, J.A., STARNER, T., 2005), tem contribuído em muito nesta expansão, principalmente para os equipamentos eletrônicos. Mas ainda hoje, só as baterias não são o suficiente para a utilização prolongada de equipamentos dependentes de energia elétrica, limitando assim, o desenvolvimento de pesquisas de campo que se encontrem afastadas de algum sistema de abastecimento de energia elétrica.

Muitas vezes a forma de ter acesso a essa energia é por geração a partir de combustíveis fósseis, onde tal geração é inconveniente, pois a mesma não é renovável, tem altos índices de poluição, carece de manutenção frequente, é ruidosa, além de ser de difícil transporte devido ao peso e volume (PEREIRA, E. B. A., 2013). Outra forma utilizada é a rede elétrica, mas a mesma se apresenta inviável na maioria das localidades isoladas por gerar grandes perdas, impacto ambiental e dificuldade na instalação devido às linhas de transmissão (IMHOFF, J., 2007 e PEREIRA, E. B. A., 2013).

O sistema de energia fotovoltaico, por outro lado, apresenta muitas vantagens para sua implantação nestas localidades de difícil acesso, pois tal energia pode ser gerada localmente (não necessita de linhas de transmissão até o local). Também é uma energia limpa e silenciosa, renovável, de baixo impacto à fauna e à flora, duradoura e com uma baixa necessidade de manutenção, podendo substituir de forma eficiente outros tipos de geração de energia (CARANNANTE, G., et. al., 2009, IMHOFF, J., 2007 e PEREIRA, E. B. A., 2013). Por muito tempo a tecnologia da geração de energia por sistemas fotovoltaicos esteve fora do mercado devido ao seu alto custo, porém com o desenvolvimento da tecnologia destes sistemas e os incentivos ofertados pelos governos (IMHOFF, J., 2007) a sua utilização já é competitiva.

Tendo em vista as vantagens da utilização dos sistemas fotovoltaicos em áreas desprovidas de energia elétrica, e, como uma forma de facilitar o trabalho de pesquisadores que utilizam equipamentos em campo dependentes da mesma, tais

como GPS, estação total, nível digital, computador portátil, entre outros, o presente trabalho propõe uma forma de integrar um destes equipamentos com um sistema fotovoltaico.

Este projeto, baseando-se em eletrônica de potência, controle e geração de energia renovável, trabalha um protótipo composto de um conversor CC-CC, um sistema fotovoltaico e baterias externas. Este sistema busca a gestão da energia obtida do sistema fotovoltaico, o armazenamento em baterias externas de forma a reduzir perdas, e a transmissão da energia para a carga (equipamento de campo) de forma adequada com elevado rendimento.

O equipamento escolhido para a realização deste trabalho foi um computador portátil por não ser tão específico, podendo ser utilizado em um maior número de pesquisas, além de se ter mais fácil acesso para a realização dos testes, que serão realizados dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, utilizando-se do sistema fotovoltaico já instalado na mesma.

## 1.1 TEMA

Desenvolvimento de um carregador portátil autônomo para equipamentos utilizados em áreas desprovidas de energia elétrica, por meio de um arranjo de módulo fotovoltaico, conversor e bateria. Para fins de estudo e desenvolvimento do protótipo, o aparelho escolhido para ser carregado foi um computador portátil.

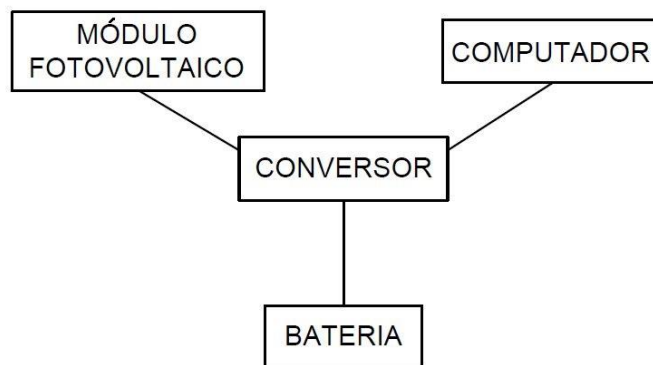
### 1.1.1 Delimitação do tema

O projeto desenvolvido envolve o estudo e construção de um protótipo que, utilizando um sistema autônomo de geração de energia, é responsável pela recarga de um equipamento usado em campo. A elaboração do protótipo foi realizada visando a utilização de um computador portátil como equipamento, pois o mesmo não só é mais acessível para elaboração de testes como também tem uma grande escala de utilização em pesquisas.

A Figura 1 mostra um arranjo interligando as principais partes do projeto, no qual o conversor é o elemento central, pois é ele que determina a interligação entre o



módulo fotovoltaico, computador e bateria. O conversor também é o que demandou mais tempo do projeto, pois nele foram feitos o controle de energia que sai do módulo.



**Figura 1 - Arranjo dos elementos do projeto**  
**Fonte: Autoria própria.**

Segundo Coelho (2008, p. 51), o ponto de operação do módulo fotovoltaico está ligado às condições climáticas e à carga em que está conectado, sendo desejável empregar algum algoritmo de MPPT – *Maximum Power Point Track*, ou Rastreadores de Máxima Potência, a fim de maximizar a potência gerada pelo módulo.

## 1.2 PROBLEMA E PREMISSA

Várias pesquisas e estudos existentes exigem a utilização de equipamentos elétricos. Quando estes estudos são realizados em áreas isoladas, há a necessidade de fornecimento de energia elétrica responsável por manter em funcionamento vários equipamentos essenciais à pesquisa.

A fim de facilitar os estudos com tais aparelhos, buscou-se através deste trabalho elaborar um sistema que venha a suprir a energia necessária para a utilização de um equipamento que está afastado dos sistemas de distribuição de energia convencional.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolvimento um conversor CC-CC que, integrado à módulos fotovoltaicos e baterias, sirva para alimentar um computador portátil, aumentando a autonomia do sistema.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos deste trabalho foram:

- Pesquisar sobre baterias, controladores de carga, e módulos fotovoltaicos;
- Pesquisar sobre as possíveis topologias e controle a ser empregado no conversor;
- Projetar e simular do conversor;
- Construir o protótipo e implementar o mesmo;
- Analisar os resultados;
- Registrar os resultados.

## 1.4 JUSTIFICATIVAS

Entre as opções de geração de energia foi escolhida a fotovoltaica para a realização do projeto. Várias são as razões para a utilização de módulos fotovoltaicos, tais como: ausência de ruído e de outros tipos de poluição; utilização de energia limpa e renovável; baixo impacto ambiental (NASCIMENTO, 2004, p.5). Mas a principal delas é a mobilidade dos módulos fotovoltaicos, que é superior aos demais meios de geração, o que a torna ideal para regiões desprovidas de energia elétrica, ou que são de difícil acesso à rede.

A energia solar é o mais abundante e constante recurso energético na terra e está disponível para o uso tanto direto como indireto (WORLD ENERGY RESOURCES, 2013, p. 2).

A elaboração de tecnologias que deem suporte a pesquisas em locais isolados é fundamental para o crescimento e incentivo das mesmas.

A construção de um sistema portátil para aumentar a autonomia de equipamentos utilizados em pesquisa de campo em locais de difícil acesso não é comum, portanto existem poucas tecnologias para este tipo de aplicação, motivo que nos leva à elaboração do mesmo.

Outro ponto que motiva a realização deste trabalho é sua abrangência nos assuntos estudados na engenharia, pois o mesmo contempla áreas de controle, programação, eletrônica de potência, sustentabilidade entre outras. O resultado desta abrangência é que a mesma promove um melhor preparo e confiança para o trabalho de engenheiro que não é feito por matérias específicas, mas pela união destas.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização deste trabalho foi feito um levantamento bibliográfico em livros e artigos científicos que se relacionassem com o tema deste projeto, abordando equipamentos e pesquisas realizadas em campo, computadores portáteis, painéis fotovoltaicos, baterias e conversores CC-CC. Com o fim da pesquisa foram determinadas as especificações do protótipo, quanto à topologia do conversor, bateria a ser utilizada, saída do sistema para o computador entre outras.

A etapa seguinte refere-se ao projeto e simulação do protótipo o qual, se utilizando de ferramentas computacionais, foi realizado através do conhecimento adquirido no curso de Engenharia de Controle e Automação.

Por fim, foram realizadas a construção do protótipo e a realização de testes no mesmo. Com a realização de testes foram obtidos assim os resultados do projeto e, conseqüentemente, foram feitas as análises para verificar se os mesmos estão adequados com os propostos.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é descrita a seguir:

No capítulo 1, é feita a introdução do trabalho, onde é descrito o tema e sua delimitação, os problemas e premissas, as justificativas, e o procedimento metodológico. Em sequência, no capítulo 2, é realizado o embasamento teórico sobre sistemas fotovoltaicos autônomos, onde são abordados tipos de baterias utilizadas, funcionamento de controladores de carga para as baterias, tipos de módulos fotovoltaicos e suas ligações, algumas das arquiteturas empregadas neste tipo de sistema, e demais informações que se fizerem necessárias. No capítulo 3 é abordada a topologia do conversor, tratando das topologias pesquisadas, as topologias necessárias para um melhor entendimento da topologia, e a topologia final e suas formas de funcionamento. A simulação do conversor escolhido para este trabalho é tratada no capítulo 4, e, em seguida, no capítulo 5, é detalhado o desenvolvimento do protótipo. No capítulo 6 são apresentados os resultados, bem como as análises realizadas. Por fim, no capítulo 7 constam as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 BASE TEÓRICA

Com o intuito de desenvolver o projeto proposto neste trabalho, foram necessários estudos sobre os elementos que constituem o carregador, incluindo as áreas de tecnologia fotovoltaica, bateria, controlador de carga, saída do sistema, e conversor. Além disso, foi estudado também o controle a ser utilizado, que tem a finalidade de manter o funcionamento correto do conversor com suas entradas e saídas. Assim, neste capítulo serão mostradas as características relevantes de cada um desses componentes para este projeto.

### 2.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA

Uma célula solar fotovoltaica é um dispositivo no qual ocorre o efeito fotovoltaico, que consiste basicamente na conversão da energia luminosa em energia elétrica. Ela é composta por duas camadas de material semicondutor, um tipo p e outro tipo n. É pela reação do fóton proveniente da luz solar com essas camadas, que surge uma diferença de potencial nos terminais do módulo fotovoltaico.

A seguir estão descritos os principais tipos de células fotovoltaicas utilizadas:

**Monocristalino:** é fabricada a partir da serragem de lingotes de silício monocristalino, que são constituídos de uma estrutura cristalina única. Apresenta uma eficiência em torno de 18% para célula comercial e 14% para módulo comercial.

**Multicristalino ou Policristalino:** seu processo de fabricação é mais simples e utiliza temperaturas mais baixas quando comparado com a fabricação das células de silício monocristalino. O bloco cilíndrico não é composto de um único cristal, o que reduz a eficiência (15% para célula comercial e 13% para módulo comercial) e o custo de fabricação, por conta da quantidade menor de energia necessária na fabricação (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

**Filmes Finos:** as células de filmes finos são em geral bastante finas, compostas por camadas de espessura da ordem de micrômetros. Sua fabricação se dá pela deposição de vários tipos de materiais semicondutores sobre superfícies rígidas ou flexíveis. Como o consumo de energia e de materiais semicondutores é reduzido, o custo dos módulos de filmes finos é menor quando comparado a outras tecnologias.

Outras vantagens são a possibilidade de as células serem usadas em superfícies flexíveis, o que é ideal para equipamentos portáteis, o melhor aproveitamento da luz solar para menores níveis de irradiância, e a menor diminuição da produção de energia com o aumento da temperatura, em comparação às outras tecnologias.

Entretanto, apesar das diversas vantagens, o módulo de filme fino é o que possui menor eficiência no mercado, assim, também precisa de uma área de módulo maior para produzir a mesma energia que os módulos de tecnologia de silício cristalino. Outra desvantagem é o maior custo de mão de obra e de material para sua instalação do que os módulos de silício cristalino.

A denominação filme fino é usada para diferentes tecnologias, como: silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) (PINHO, GALDINO et al., 2014).

## 2.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Segundo o fabricante Yingli Solar, o módulo fotovoltaico de silício cristalino é formado por várias células ligadas em série, sendo posteriormente envoltas por duas folhas transparentes de EVA (etil vinil acetato), cobertas com vidro na parte superior, e finalmente, uma moldura de alumínio e uma caixa de conexão dão estabilidade e proteção final.

O número de células em série determina as características de tensão de saída do módulo, ou seja, um módulo para carregar uma bateria de 12 V pode ser composto por 36 células em série (0,5 V para cada célula, gerando no total 18 V).

Como o módulo fotovoltaico de silício policristalino está à disposição na Universidade, apresenta uma eficiência relativamente boa, e é amplamente utilizado no mercado, optou-se pelo seu uso no estudo deste trabalho.

## 2.3 BATERIA

Para o fornecimento constante de energia por determinado intervalo de tempo, e para estabilizar a tensão fornecida aos equipamentos, já que a tensão de saída dos módulos pode variar, é necessário o uso da bateria em um sistema fotovoltaico autônomo.

Nos sistemas fotovoltaicos é utilizada a bateria estacionária, que é constituída por placas grossas metálicas que permitem fornecer correntes constantes por um longo período de tempo.

Entre os tipos de baterias estacionárias, as mais populares são as de chumbo-ácido, que podem ser de ácido líquido ou em gel, e seladas ou abertas. Também há baterias de níquel cádmio (NiCD) e níquel-metal-hidreto (NiMH), que são mais caras, quando comparadas às anteriores, permitem descargas mais profundas (cerca de 90%) sem ter sua vida útil reduzida, suportam elevadas variações de temperatura e são menores mesmo com a mesma capacidade.

Um fator importante a ser considerado na escolha de uma bateria é a sua vida útil. Esta é determinada pelo número de ciclos de carga e descarga que a bateria pode realizar, e pelo envelhecimento. O número máximo de ciclos depende da profundidade da descarga realizada, ou seja, a porcentagem da carga da bateria no final da descarga. A vida útil também reduz com a temperatura de operação e de armazenamento. Logo, o dimensionamento do sistema fotovoltaico interfere na duração da bateria, sendo que uma profundidade de descarga maior reduz seu tempo de vida, ou seja, quanto maior for a porcentagem de carga que é retirada da bateria ao longo de um ciclo de uso, menor é a durabilidade da bateria.

As principais informações fornecidas pelos fabricantes são capacidade de carga, tensão de flutuação, tensão de carga e coeficiente de compensação de temperatura. A capacidade de carga é a capacidade que a bateria tem de fornecer certa quantidade de ampère-hora com base em um tempo de carregamento. A tensão de flutuação corresponde à situação em que a bateria está carregada e deve-se manter essa faixa de tensão para que a durabilidade seja maior. O dispositivo que comanda essa manutenção é o controlador de carga. A tensão de carga corresponde à tensão de carga máxima da bateria. E por último, o coeficiente de compensação de temperatura relaciona a variação de tensão com a temperatura (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

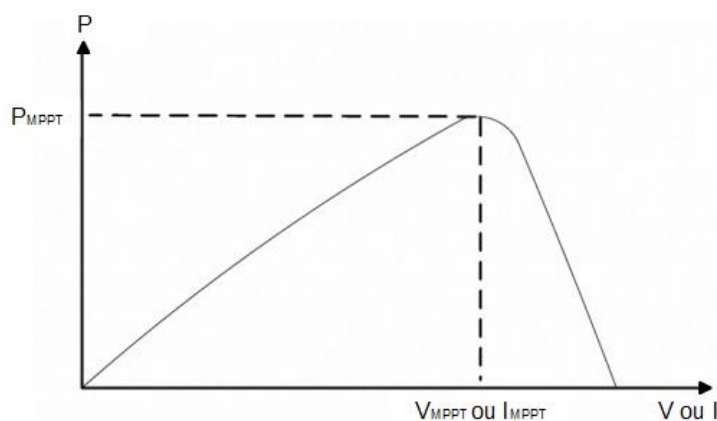
## 2.4 CONTROLADOR DE CARGA

O controlador de carga tem como função controlar a carga da bateria e prolongar sua vida útil, impedindo que ocorram sobrecargas ou descargas excessivas. A situação de carga completa nas baterias de chumbo ácido, por exemplo, acontece quando a bateria atinge um valor próximo de 13,6 V, e a equalização da bateria ocorre em 14,4 V, logo, para evitar a sobrecarga, o controlador de carga desconecta o módulo fotovoltaico do sistema. Para o caso contrário, se a bateria for descarregada até abaixo de aproximadamente 10,5 V, para o caso da de chumbo ácido, o controlador faz com que a bateria pare de fornecer energia.

Também pode maximizar a produção de energia do módulo fotovoltaico, por meio do MPPT, ou *Maximum Power Point Tracking* – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, e otimizar o processo de carregamento da bateria pelo PWM, ou *Pulse Width Modulation* – Modulação da Largura de Pulso. O MPPT permite que o módulo fotovoltaico opere no ponto em que sua potência é máxima para qualquer irradiância e temperatura, e o PWM realiza o controle da corrente de carga da bateria por meio de chaveamento (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Na Figura 2, observa-se a relação entre a potência e a corrente e tensão de saída de um módulo fotovoltaico. Para cada valor de irradiância e temperatura existe uma curva característica, sendo que há um ponto onde o módulo opera com eficiência máxima, chamado Ponto de Máxima Potência (MPP). O MPPT é usado para manter o módulo operando mais perto do MPP (MAITY, MITRA, MAJEE, CHOUWDHURI, BERA, 2012). Quando a corrente ou a tensão do módulo, e a potência aumentam, o ponto de operação está abaixo do MPP ( $V < V_{MPP}$  ou  $I < I_{MPP}$ ). Já quando a corrente ou a tensão aumentam e a potência diminui, o ponto de operação está acima do MPP ( $V > V_{MPP}$  ou  $I > I_{MPP}$ ) (BAE, KWASINSKI, pg. 3, 2009).





**Figura 2 - Curva característica V ou I x P**  
**Fonte: Adaptado de Bae; Kwasinski, 2009.**

Alguns controladores de carga têm a função de gerenciar o carregamento da bateria, o que otimiza o carregamento e a durabilidade da mesma. O carregamento pode ser dividido em três estágios. No estágio de carregamento pesado a corrente é maximizada dentro do limite suportado pelo controlador, e a bateria é carregada rapidamente. No estágio de absorção a bateria está quase totalmente carregada, e é feito um carregamento lento, sendo que a corrente vai diminuindo lentamente. Por fim, no estágio de flutuação, o controlador mantém a tensão da bateria em certa faixa (na bateria de chumbo ácido entre 13,2 e 13,8 V) e corrige o valor da tensão flutuação de acordo com o coeficiente térmico da bateria (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

## 2.5 CARGA (SAÍDA DO SISTEMA)

Para determinar a saída do sistema foi analisada a entrega de energia para um computador portátil. Estes computadores são normalmente alimentados por uma bateria de 3 a 4 células em série o que fornece uma tensão que varia de 8,7 V a 16,8 V. Para carregar essa bateria de forma adequada e permitir o funcionamento do computador durante o processo, o adaptador fornece uma tensão de 19 V (SUM, J, et. al, 2006). A **Error! Reference source not found.** mostra um esquemático da estrutura de alimentação de um computador portátil. Este valor é comum para a maioria dos computadores portáteis, sendo comum uma diferença de mais ou menos 0,5 V.

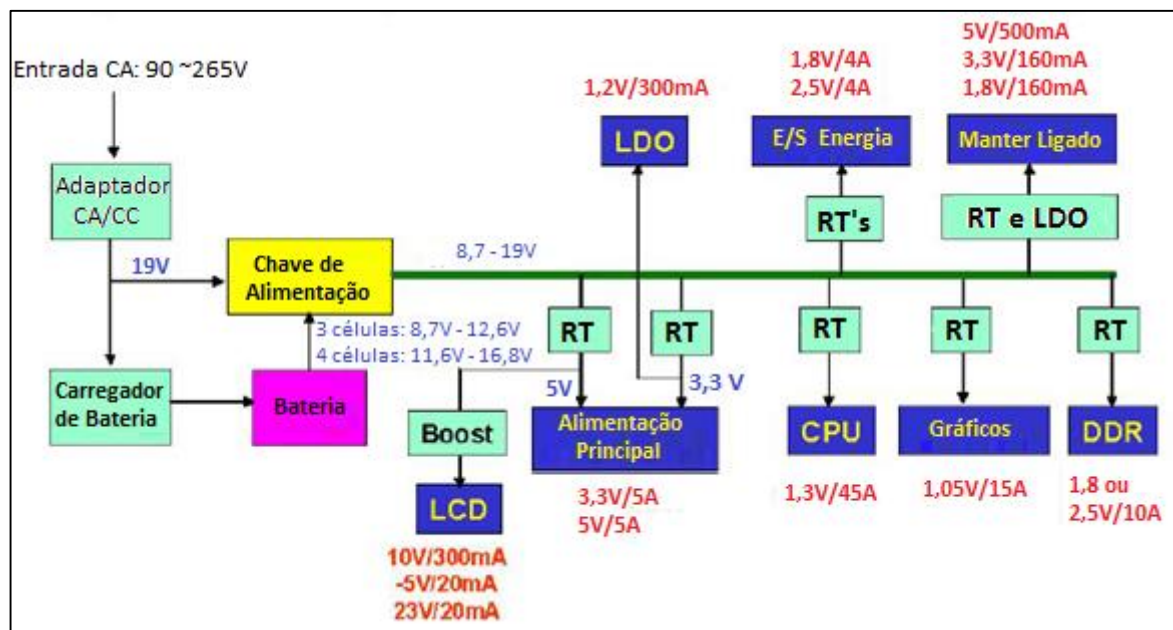


Figura 3 - Arquitetura de alimentação para notebook  
Fonte: Adaptado de SUM, J, et. al, 2006.

Sendo RT regulador de tensão, LDO *low dropout regulator*, e DDR *double data rate memory*.

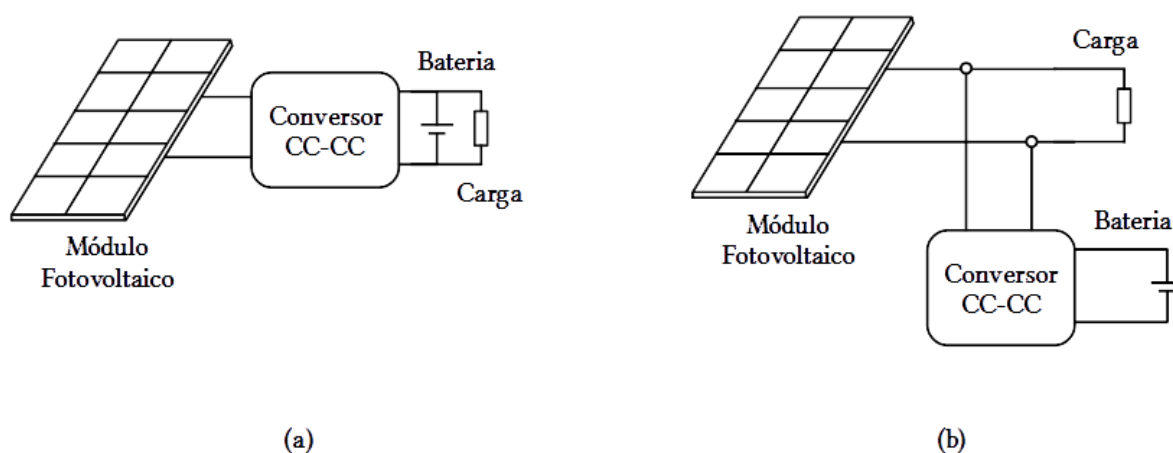
Quanto à corrente necessária a ser fornecida para o computador, a mesma varia de acordo com as especificações do mesmo, pois, dependendo do processamento e demais fatores, a potência demandada pode variar bastante. A corrente fornecida pelos adaptadores varia desde pouco mais que 1,5 A a aproximadamente 5 A.

Portanto para este trabalho, a fim de abranger um bom número de computadores, definiu-se as seguintes especificações de saída para o conversor: 19 V e 2,5 A.

## 2.6 TOPOLOGIA

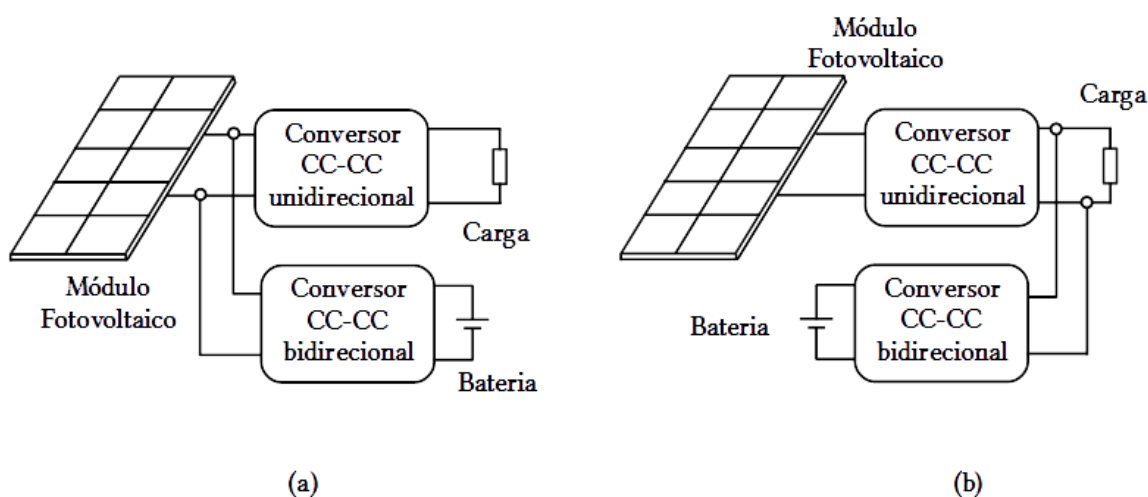
Para se definir a topologia do conversor é necessário decidir a forma que será conectada cada componente do sistema. As arquiteturas mais convencionais são a utilização do módulo fotovoltaico ou da bateria ligado diretamente à carga como mostrado na Figura 4, onde em (a) tem-se a bateria sendo conectada diretamente a carga e em (b) o módulo. Caso os valores de tensão, do módulo e da bateria, não

sejam compatíveis é comumente adicionado um segundo conversor, que pode ser ligado na saída do módulo ou na entrada da carga (Figura 5).



**Figura 4 - Arquiteturas com um único conversor**

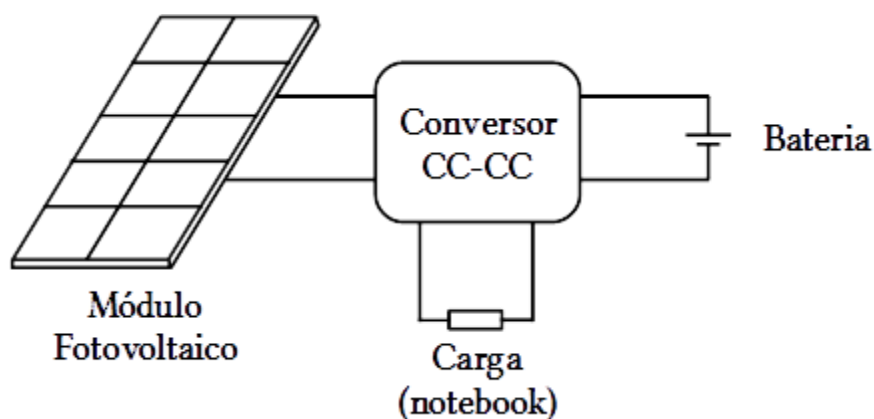
Fonte: Adaptado de Gules, R., et. al, 2008.



**Figura 5 - Arquiteturas com dois conversores**

Fonte: Adaptado de Zhou, Z., et. al, 2012.

Uma nova possibilidade que tem sido utilizada atualmente é a utilização de conversores com múltiplas entradas, que possibilita a redução do número de componentes e de espaço em relação à opção anterior que faz utilização de dois conversores. Neste caso o módulo fotovoltaico trabalha como entrada no conversor, a bateria atua de forma bidirecional (fonte e carga) e tem-se o computador portátil (a carga) como saída como mostra a Figura 6. Apesar das vantagens que esta arquitetura demonstra, ela também traz algumas desvantagens, como é o caso de ter um rendimento normalmente inferior ao das arquiteturas de conversores convencionais.



**Figura 6 - Arquitetura conversor multiportas**  
**Fonte: Autoria própria.**

Em se tratando do interesse do projeto, que é a facilitar a mobilidade, tanto um arranjo do módulo fotovoltaico muito grande como a bateria de tensão mais elevada, são indesejáveis devido a dificuldades de movimentação e aumento do peso do equipamento. Portanto torna-se necessária a existência de um conversor entre ambos e a carga para possibilitar a adequação do valor de tensão. Por fim, visando diminuir o número de componentes e o tamanho total do projeto optou-se por utilizar um conversor com múltiplas entradas ao invés de dois conversores.

Após ter sido definida a arquitetura a ser implementada (um conversor três portas), começou a ser desenvolvido o projeto da topologia do conversor em si, que será abordada no capítulo 3.

## 2.7 CONTROLE PID

O controlador PID é um dos métodos de controle mais utilizado, devido o mesmo ser robusto, de fácil entendimento, e com uma performance satisfatória para uma grande variedade de processos industriais (FACCIN, 2004).

Este tipo de controle consiste na união de três modos de controle: proporcional, integral e derivativo. A atuação do controle proporcional se dá diretamente proporcional ao erro, desta forma o quanto maior for o erro maior será a atuação do controle. Logo, este controle possibilita uma rápida dinâmica do processo controlado, por proporcionar um rápido ajuste da variável manipulada. Contudo, tal controle traz a desvantagem de que o mesmo apresenta erro em regime permanente.

A fim de solucionar este problema é adicionado o controle integrador, sendo sua ação relacionada à integral do sinal do erro no tempo. Apesar da vantagem apresentada neste controle da tendência a eliminar o erro de regime permanente, o mesmo reduz a estabilidade da malha de controle. Por fim tem-se o controle derivativo, onde sua ação é proporcional a taxa de variação do sinal de erro. Este controle estima a tendência de aumento ou redução do erro futuro. De forma a aumentar a velocidade da correção do processo, além de possibilitar a redução do overshoot. A desvantagem deste controle encontra-se na sua alta sensibilidade para ruídos do sistema e na não correção de erros constantes no processo (FACCIN, 2004).

Dentre as diversas maneiras de se realizar a sintonia do controle PID ao processo, a utilização da sintonia de forma experimental é uma das mais facilmente aplicáveis. Devido ao caráter inovador da topologia a ser implementada optou-se por esta forma de sintonia.

## 2.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo abordou-se a base teórica para o entendimento de alguns assuntos empregados para a elaboração do projeto proposto. É interessante destacar que os conteúdos sobre o funcionamento do módulo fotovoltaico, da bateria, do controlador de carga e da saída do sistema são o embasamento utilizado para se determinar os valores e o ponto de operação do conversor. Os outros dois tópicos abordados demonstram a forma pela qual se chegou na escolha de uma topologia *three-port* e o controle proposto para ser empregado ao conversor.

### 3 TOPOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo trata de todas as topologias utilizadas para o desenvolvimento do conversor. Abordando o funcionamento das mesmas, as formas de onda por elas geradas, e qualquer equacionamento necessário. Também são explicitadas as formas de funcionamento do conversor proposto para as diversas situações de operação.

Para as análises dos conversores realizadas neste trabalho foi considerada a operação em modo de condução contínua, enquanto que a razão cíclica foi definida pelo tempo de condução da chave  $S_1$  dividido pelo período de comutação.

#### 3.1 TOPOLOGIAS PESQUISADAS

Depois de decidida a arquitetura do conversor, foram analisadas topologias referentes à mesma (conversores *three-ports*), de modo a compará-las, e por fim, obter uma topologia capaz de preencher adequadamente os requisitos desejados.

Na Figura 7 e na Figura 8 têm-se algumas das topologias pesquisadas.

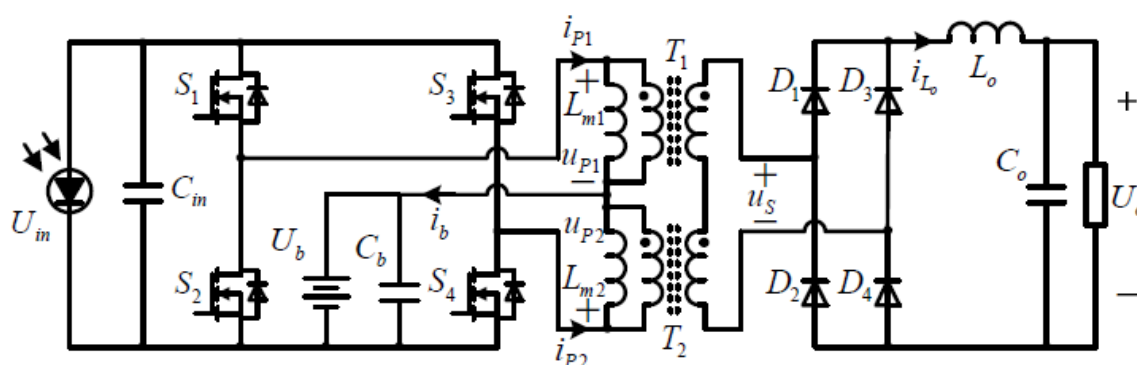


Figura 7 - Topologia ponte completa *three-port*  
Fonte: Hu, W. et. al., 2014.

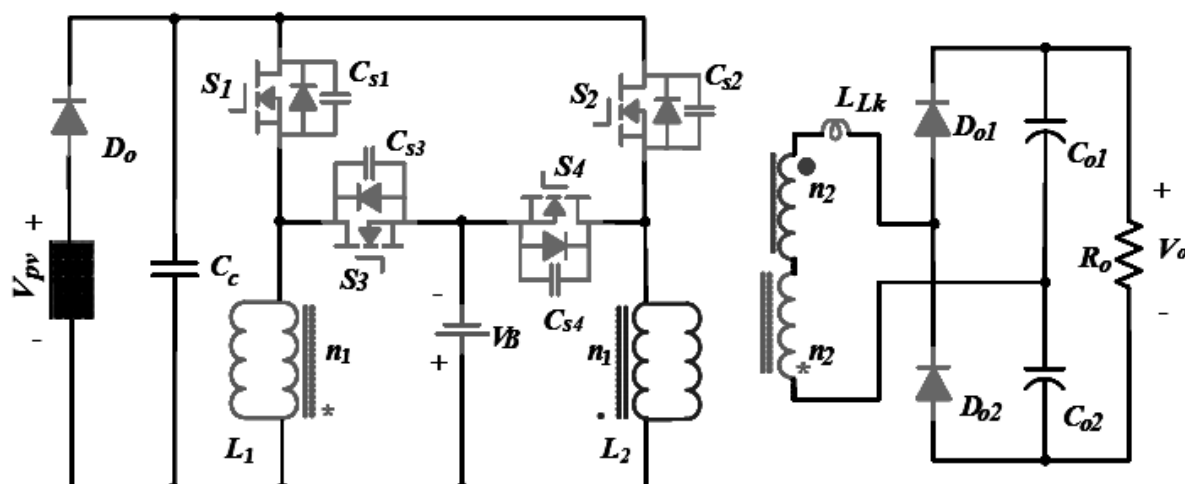
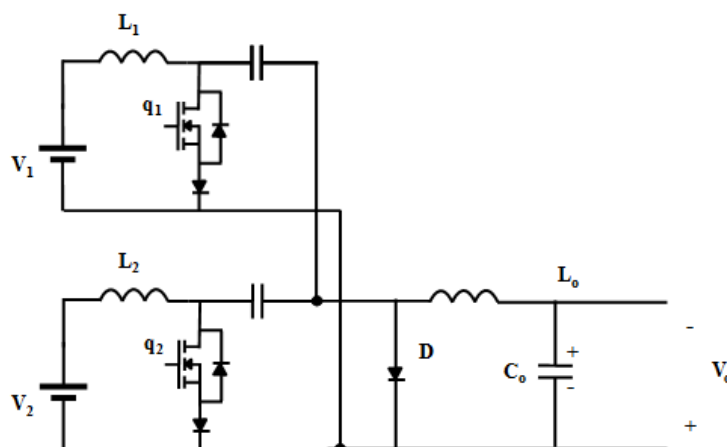


Figura 8 - Topologia three-port isolada  
Fonte: Hu, Y. et al., 2013.

Observa-se que as Figuras 7 e 8 tratam de topologias bastante complexas. Assim como nestas topologias mostradas, notou-se dentre as topologias pesquisadas que em sua grande maioria eram compostas de no mínimo quatro chaves controladas. Tal configuração permite uma maior possibilidade de controle, buscado nestes conversores devido ao número de parâmetros controláveis (tal como corrente, tensão, etc.). Porém, os mesmos são formados por dois braços de comutação, o que incrementa em tamanho, peso e custo, quesitos bastante indesejáveis para este projeto. Em vista do projeto proposto não necessitar de um controle tão rigoroso, busca-se simplificar o conversor a ser executado, motivo pelo qual na topologia adotada optou-se em reduzir o número de braços de comutação.

Outro ponto importante decidido na topologia foi em relação à isolação galvânica. Dentre os conversores *three-ports* estudados, os que apresentavam uma topologia mais simplificada normalmente não possuíam este tipo de isolação, como por exemplo, a topologia mostrada na Figura 9.



**Figura 9 - Topologia Cuk *multiple-input***  
**Fonte: Adaptado de Bae, S. e Kwasinski, A. 2009.**

Apesar da isolação galvânica não ser de todo necessária para o objetivo proposto (alimentação de um computador portátil), a mesma é de grande utilidade por aumentar as possibilidades de módulos fotovoltaicos e de baterias a serem utilizados no projeto, pois a isolação aumenta a flexibilidade dos valores de tensão possíveis de se obter na saída do conversor. Outra vantagem de se implementar tal isolação no conversor é a possibilidade de se utilizar em outras aplicações.

### 3.2 TOPOLOGIA PROPOSTA

Determinadas as características desejáveis para o projeto, passou-se a elaborar um conversor capaz de atender a tais requisitos. Primeiramente, atendendo a necessidade de um conversor bidirecional, devido à bateria, optou-se pela utilização do conversor Cuk bidirecional, que além de suprir tal demanda apresenta as duas entradas em corrente. Sendo do interesse deste projeto um conversor *three-port*, buscou-se nesta topologia uma terceira saída. Constatou-se, por fim, que o capacitor localizado entre as chaves do Cuk bidirecional poderia prover tal saída. Esta saída tem a mesma relação de ganho do conversor *Boost*, tanto referente à fonte  $V_1$  (módulo fotovoltaico) como à fonte  $V_2$  (bateria). Desta forma foi obtida a topologia simplificada do conversor proposto, conforme mostra a Figura 10.



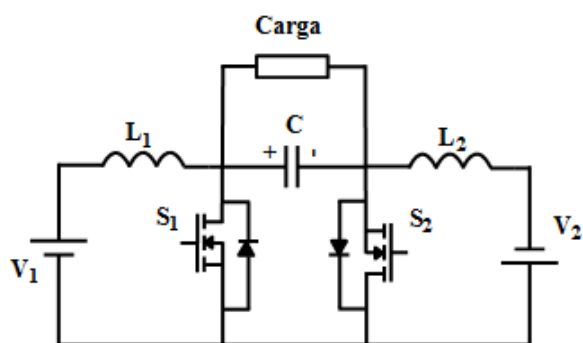


Figura 10 - Topologia Cuk *three-port*  
Fonte: Autoria própria.

Com a finalidade de ter o melhor rendimento do módulo fotovoltaico e não danificar a bateria, tem-se uma faixa de tensão bem limitada nas duas entradas do conversor. Para que estes valores de tensão na entrada possibilitem o valor exigido pelo computador é necessário fazer uma adequação dos mesmos. Várias são as formas de realizar tal adequação, poderia ser adicionado um conversor Buck na saída do conversor adicionando-se mais um comando de chaveamento, por exemplo. Porém como já mencionado anteriormente, optou-se pela isolamento galvânica no conversor. Novamente, para a adição do transformador várias topologias poderiam ser abordadas, mas já havendo um braço de comutação optou-se por implementar um conversor meia-ponte junto ao Cuk bidirecional. Esta união pode-se dar de duas formas: uma ocorre particionando o capacitor central do Cuk, sendo em seguida inserido o transformador entre os dois capacitores, conforme a Figura 11; e a outra ocorre adicionando um transformador e um capacitor entre o capacitor do conversor Cuk e o emissor da chave  $S_1$ , conforme a Figura 12.

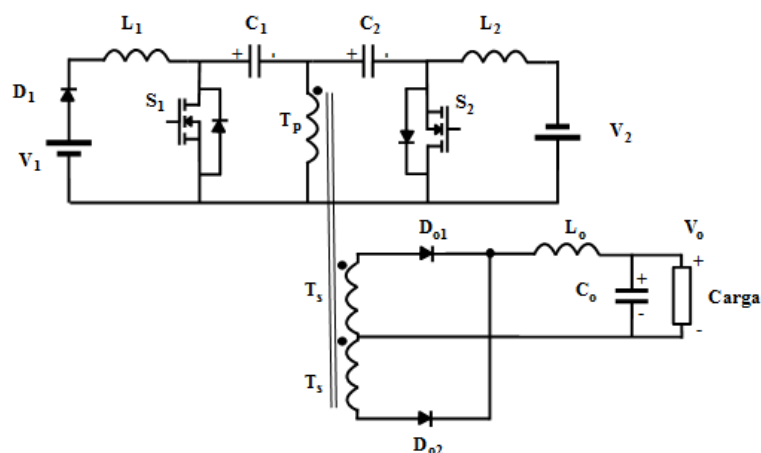
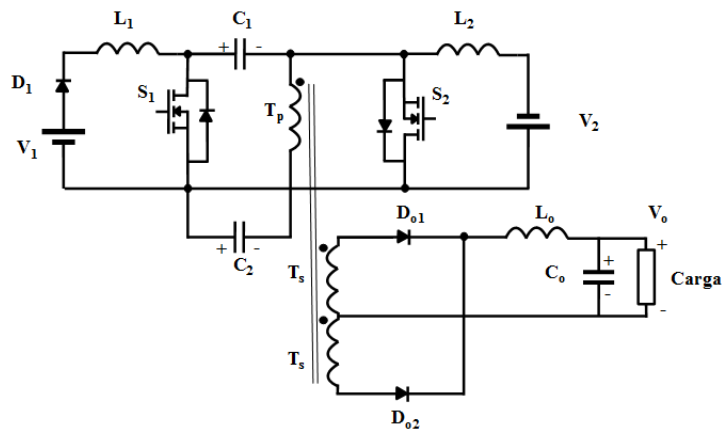


Figura 11 - Topologia proposta 1  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 12 - Topologia proposta 2**  
**Fonte: Autoria própria.**

As duas topologias propostas apresentam formas diferentes de implantação do conversor meia-ponte ao conversor Cuk bidirecional. Além das vantagens apontadas devido a isolação da saída do conversor, pretende-se com esta inserção de topologias alcançar também a comutação suave, comum à topologia meia-ponte ZVS assimétrica. Pois a comutação suave diminui as perdas no conversor possibilitando alcançar maiores níveis de rendimento.

Ao se analisar a topologia proposta 1 verificou-se uma variação de corrente indesejável nos capacitores, o que levou à escolha da topologia proposta 2 para a realização deste trabalho.

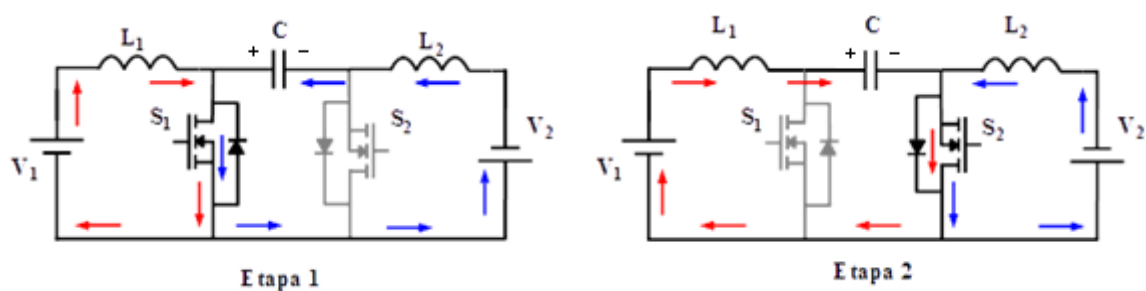
Durante a pesquisa, não foi encontrada, em nenhuma literatura, a topologia selecionada. O que contribuiu na decisão da escolha da mesma. Sendo esta uma nova topologia, optou-se em avaliar o seu potencial.

### 3.3 TOPOLOGIAS DE EMBASAMENTO

Devido o conversor proposto neste projeto ser baseado na união de dois conversores de topologia já conhecida, o Cuk bidirecional e o meia-ponte ZVS com comando assimétrico, será apresentado primeiramente o funcionamento dos mesmos, a fim de facilitar a explicação da nova topologia.

#### 3.3.1 Conversor Cuk bidirecional

O conversor Cuk como sendo bidirecional, é obtido adicionando uma chave com reversibilidade de corrente (chave que possua um diodo antiparalelo) no lugar do diodo da topologia original. Seu funcionamento pode ocorrer de três formas: com o fluxo de energia num sentido, no sentido contrário, ou com o fluxo médio de energia nulo (CARDOSO, R.L.,2007). Os fatores que definem o sentido do fluxo são: os valores de tensão das fontes  $V_1$  e  $V_2$  (sendo estas, módulo fotovoltaico e bateria respectivamente), e o período de chaveamento de  $S_1$  e  $S_2$ . A seguir se segue uma análise simplificada do funcionamento do Cuk bidirecional (Figura 13).



**Figura 13 - Etapas de funcionamento do conversor Cuk bidirecional**  
**Fonte: Adaptado de Cardoso, R.L., 2007.**

Considerando o fluxo de energia de  $V_1$  para  $V_2$  e o conversor funcionando em regime permanente, tem-se na primeira etapa, como mostrado na Figura 13, o indutor  $L_1$  armazenando a energia fornecida pela fonte  $V_1$  com a chave  $S_1$  fechada. Enquanto isso, tem-se a transferência da energia do capacitor  $C$  para fonte  $V_2$  e para o indutor  $L_2$ . Na segunda etapa da Figura 13, quando se tem a abertura da chave  $S_1$  e posteriormente a entrada em condução da chave  $S_2$ , ocorre a transferência da energia da fonte  $V_1$  e do indutor  $L_1$  para o capacitor  $C$ , e a circulação da corrente do indutor  $L_2$  para a fonte  $V_2$ . Um ponto a ser observado é que as correntes do circuito podem circular tanto pelo diodo como pela chave na segunda etapa, sendo vantajosa a circulação pela chave devido à redução de perdas.

Na Figura 14, são mostradas as formas de onda dos principais componentes do circuito do Cuk bidirecional.

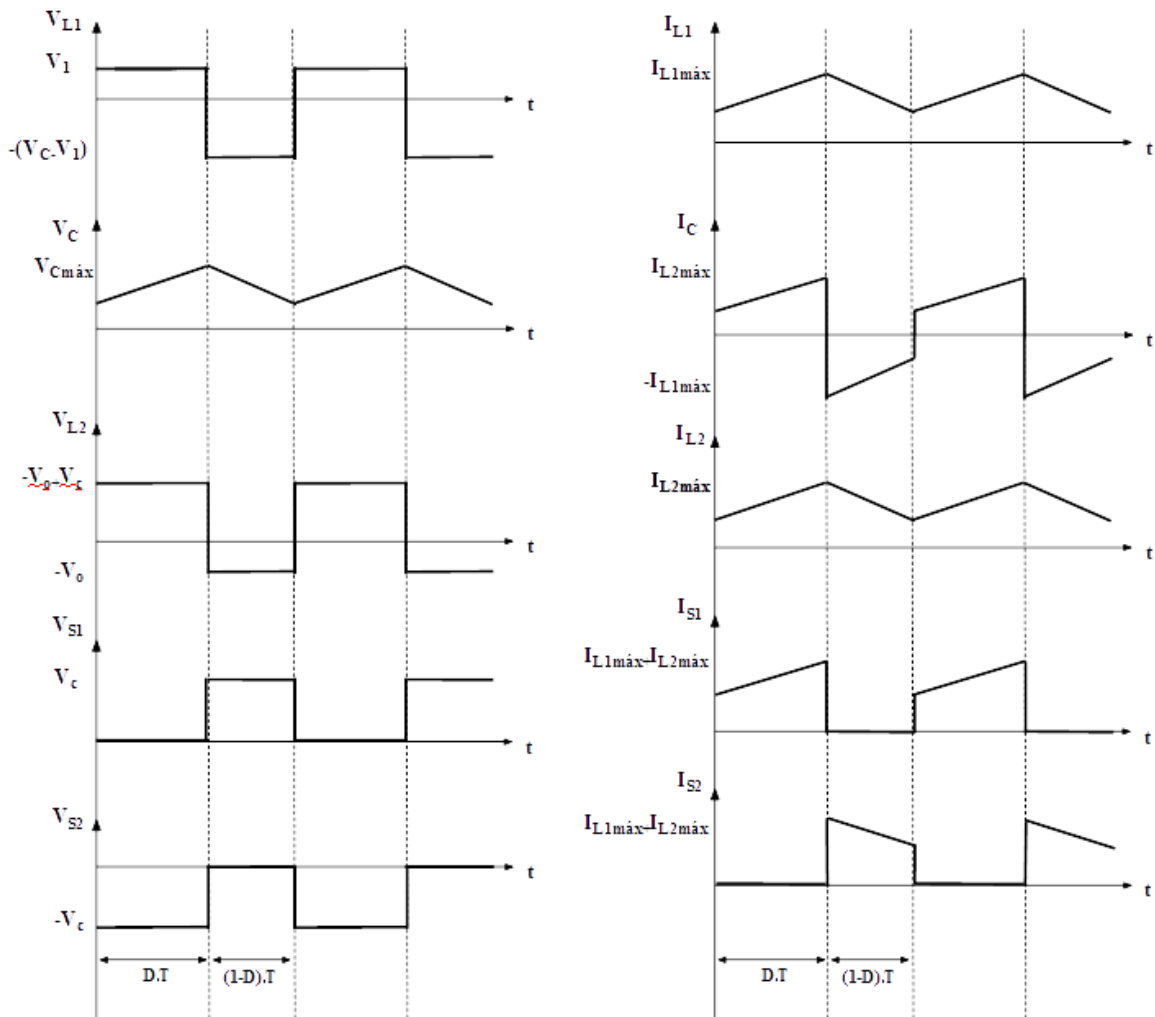


Figura 14 - Formas de onda do conversor Cuk bidirecional  
Fonte: Adaptado de Cardoso, R.L., 2007.

Partindo-se para a análise estática do conversor Cuk bidirecional, observa-se que as relações não são alteradas em relação ao conversor Cuk unidirecional, sendo possível obter as formulações através deste último. Para o conversor unidirecional tem-se o ganho dado por:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.1)$$

Considerando-se então  $V_{in}$  como a fonte de tensão  $V_1$  e  $V_o$  como sendo  $V_2$ , para a topologia do Cuk bidirecional tem-se o ganho dado pela equação 3.2, quando o fluxo de energia segue da esquerda para direita conforme a Figura 13.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.2)$$

Considerando que a corrente média no capacitor é nula em regime permanente, é possível obter os valores das correntes médias nos indutores:

$$I_{L2} = I_2 \quad (3.3)$$

$$I_{L1} = \frac{I_2 \cdot D}{(1-D)} \quad (3.4)$$

Enquanto que o valor da ondulação de corrente no indutor  $L_1$  e  $L_2$  é dado por:

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_1}{f_s \cdot L_1} \cdot D \quad (3.5)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_2}{f_s \cdot L_2} \cdot (1-D) \quad (3.6)$$

De igual forma, sabendo-se que a tensão no indutor  $L_1$  é nula, determina-se a tensão sobre o capacitor  $C$ :

$$V_C = \frac{V_1}{(1-D)} \quad (3.7)$$

Enquanto que a ondulação do capacitor é dado por:

$$\Delta V_C = \frac{I_{L2} \cdot D}{f_s \cdot C} \quad (3.8)$$

Quanto aos esforços nos semicondutores tem-se, que a corrente sobre as chaves é:

$$I_{S1} = I_{S2} = \sqrt{D} \cdot (I_{L2med} + I_{L1med}) \quad (3.9)$$

Enquanto que a tensão se dá por:

$$V_{S1} = V_C \quad (3.10)$$

$$V_{S2} = -V_C \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Conversor meia-ponte ZVS com comando assimétrico

Como comentado anteriormente, o conversor a ser desenvolvido também baseia-se no conversor em meia-ponte (*half-bridge*), o qual está representado na Figura 15. Seu funcionamento, formas de onda e equações foram baseados em (BARBI, 1999). Ressalta-se que a explicação deste conversor serve de base para a compreensão de qualquer uma das topologias propostas, tanto a escolhida como a outra opção apresentada.

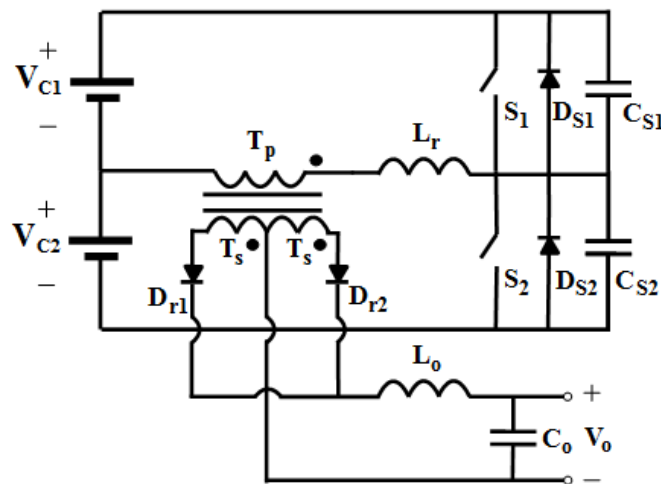


Figura 15 - Arquitetura do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Este conversor possui a característica de ser assimétrico, ou seja, os interruptores são habilitados em tempos complementares no período de chaveamento. Isso possibilita a manutenção dos intervalos de condução independentemente da razão cíclica.

A denominação ZVS refere-se à tensão nula no momento de comutação. Esta condição é atingida quando a indutância  $L_r$  realizar a transição de estado dos capacitores  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$ , por meio de sua energia armazenada. Porém, para que se obtenha o ZVS nesta topologia, é necessário que o chaveamento do PWM seja assimétrico.

Este comando assimétrico afetará os capacitores,  $C_1$  e  $C_2$ , de modo que eles apresentarão valores médios de tensão diferentes. São eles para o modo de condução contínua e em regime permanente:

$$V_{C1} = (1 - D) \cdot V_1 \quad (3.12)$$

$$V_{C2} = D \cdot V_1 \quad (3.13)$$

Com o conversor atuando sob estas características não há queda de tensão no transformador nem nos indutores, logo, o valor da tensão média sobre a chave  $S_2$  é igual ao de  $V_{C2}$ :

$$V_{S2} = D \cdot V_1 \quad (3.14)$$

Para facilitar a análise do circuito, esta será feita em torno do lado primário do transformador. Nas etapas de funcionamento serão considerados componentes ideais, e será substituído o filtro de saída por uma ponte retificadora com fonte de corrente ideal, cujo valor é igual ao da corrente da carga.

### 3.3.2.1 Etapas de funcionamento

Na primeira etapa de funcionamento do conversor meia-ponte a chave  $S_1$  está em condução, o que permite a transferência de energia da fonte  $V_1$  para a carga. A corrente que passa pela chave é igual à soma de  $I_o'$  com a corrente que passa por  $L_m$ .

E entre os pontos “a” e “b” é aplicada a tensão sobre o transformador. Na Figura 16 tem-se a representação desta etapa.

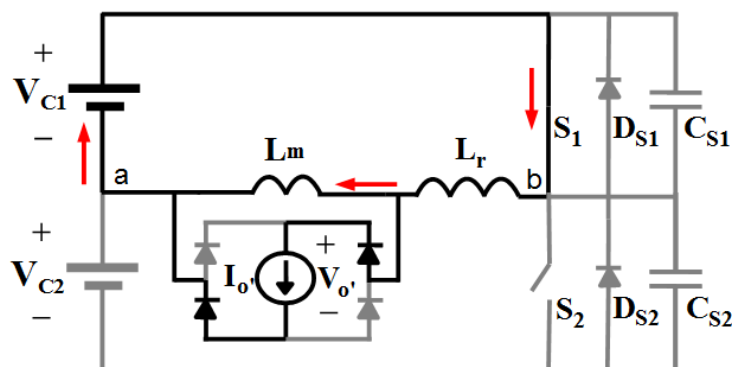


Figura 16 - Etapa 1 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Em seguida, a Figura 17 mostra que quando a chave  $S_1$  abre, há a descarga do capacitor  $C_{S1}$  e a carga do  $C_{S2}$ . As tensões destes capacitores variam de forma linear, pois a corrente envolvida na carga/descarga é constante.

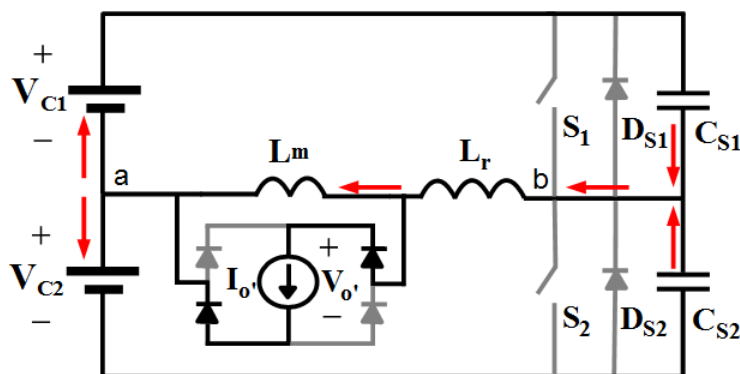


Figura 17 - Etapa 2 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Observa-se um curto-circuito na ponte retificadora, logo, a tensão entre “a” e “b” se anula, e a corrente  $I_{o'}$  se mantém na ponte de diodos. O indutor  $L_r$  transfere energia aos capacitores  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$ , e, no final da terceira etapa, a tensão em  $C_{S2}$  é zero, e em  $C_{S1}$  é  $V_1$ . A representação está mostrada na Figura 18.



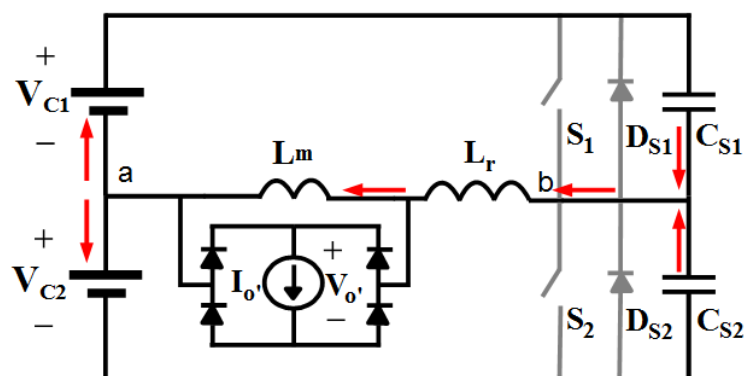


Figura 18 - Etapa 3 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Na quarta etapa, após  $C_{S2}$  atingir tensão nula, o diodo  $D_{S2}$  do MOSFET entra em condução, enquanto que  $L_r$  transfere energia à fonte  $V_1$ . A ponte retificadora continua em curto, e  $I_{o'}$  permanece circulando entre os diodos. Esta etapa, que pode ser analisada na Figura 19, continua até a corrente de  $L_r$  se anular.

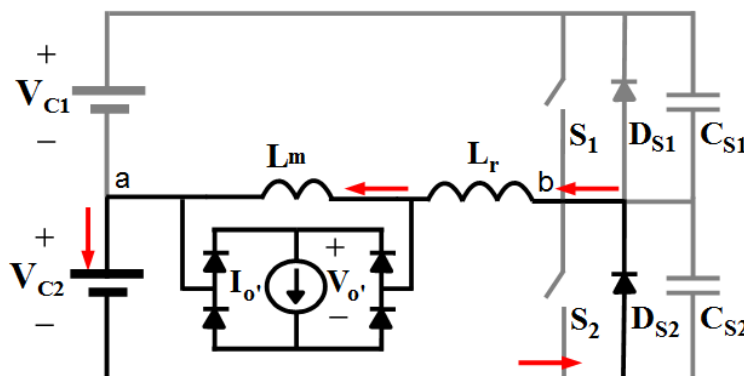
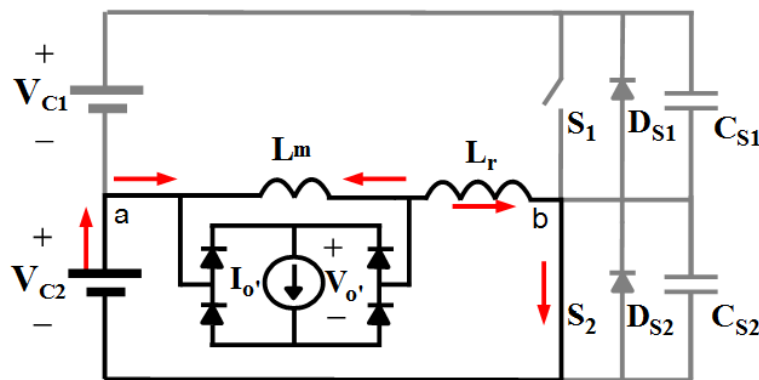


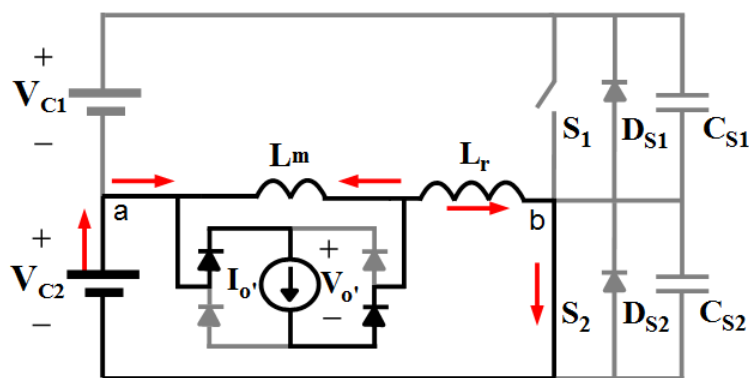
Figura 19 - Etapa 4 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Após  $C_{S2}$  e  $D_{S2}$  conduzirem corrente, pode-se observar na Figura 20 que a chave  $S_2$  fecha, permitindo que a corrente decresça linearmente, até atingir  $-I_{o'}$  mais a corrente da indutância  $L_m$ .



**Figura 20 - Etapa 5 do conversor meia-ponte**  
 Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Nesta etapa a ponte retificadora deixa de ser um curto-circuito, e a corrente pode ser transferida da fonte para a carga, como se pode observar na Figura 21. Nota-se que a corrente que sai da ponte de diodos vai para o sentido contrário das Etapas 1 e 2.



**Figura 21 - Etapa 6 do conversor meia-ponte**  
 Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

A sétima etapa apresenta o bloqueio de  $S_2$ , sob tensão nula (Figura 22). Assim, os capacitores  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$  entram em condução, transmitindo corrente para os outros dois capacitores  $C_1$  e  $C_2$ . Nesta etapa a tensão de  $V_{C1}$  apresenta valor igual à  $(1-D) V_i$ .

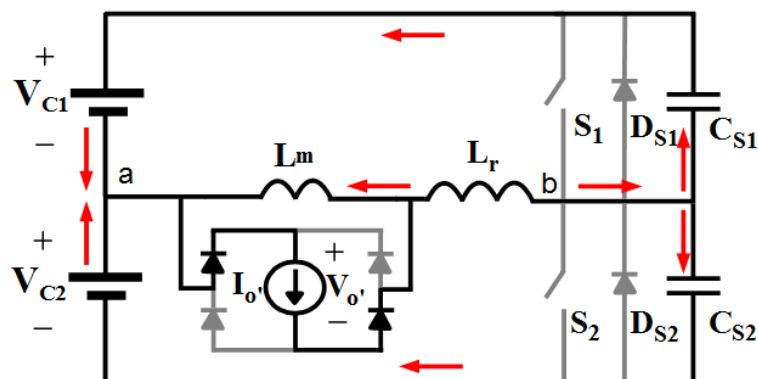


Figura 22 - Etapa 7 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Em seguida, na etapa 8 (Figura 23), a indutância  $L_r$  transfere energia aos capacitores  $C_{S1}$  e  $C_{S2}$ , e, quando a tensão de  $C_{S1}$  atinge  $(1-D)V_1$ , a tensão entre “a” e “b” se anula, o que faz com que a ponte retificadora volte a ser um curto-circuito, e a corrente  $I_o'$  e a corrente da indutância  $L_m$  fiquem circulando nos diodos da ponte. No final desta etapa, como  $C_{S1}$  passará a descarregar, sua tensão será nula.

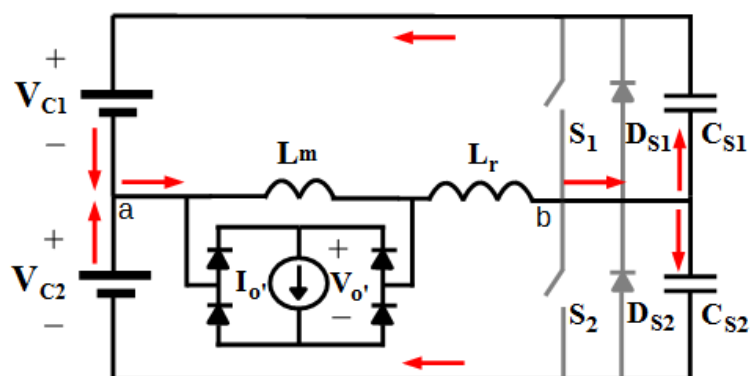


Figura 23 - Etapa 8 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Na nona etapa, representada pela Figura 24, o diodo  $D_{S1}$  entra em condução, sendo que o indutor  $L_r$  libera corrente linearmente para o diodo, até atingir valor zero. A chave  $S_1$  só fechará sob tensão nula, o que ocorre na próxima etapa.

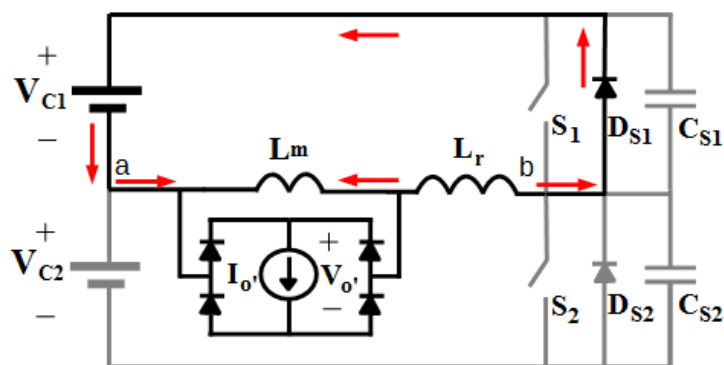


Figura 24 - Etapa 9 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Na última etapa de funcionamento deste conversor (Figura 25), a chave  $S_1$  passa a conduzir, o que faz com que, em oposição à etapa 9, a corrente em  $L_r$  cresça linearmente, até atingir o valor de  $I_{o'}$  mais a corrente que passa por  $L_m$ .

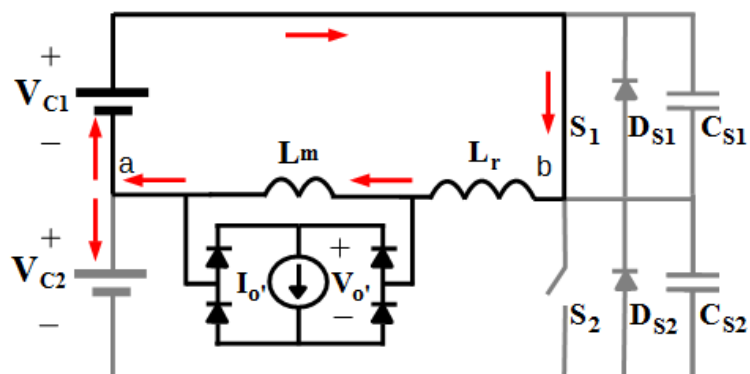


Figura 25 - Etapa 10 do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

Nas etapas onde houve uma mudança de estado no indutor pôde ser observado que os diodos da ponte retificadora permaneceram em curto, impedindo a transferência de energia à carga. Nesses intervalos, somente a indutância  $L_r$  recebeu energia, e, como resultado, o tempo em que há aplicação de um valor de tensão diferente de zero na saída é reduzido. E, como há queda de tensão em  $L_r$ , a razão cíclica apresenta uma perda proporcional à corrente de saída.

### 3.3.2.2 Formas de onda

As formas de onda para este conversor estão representadas na Figura 26, sendo que, a fim de simplificá-las, o tempo de comutação considerado é zero, ou seja, a comutação é vista como instantânea.

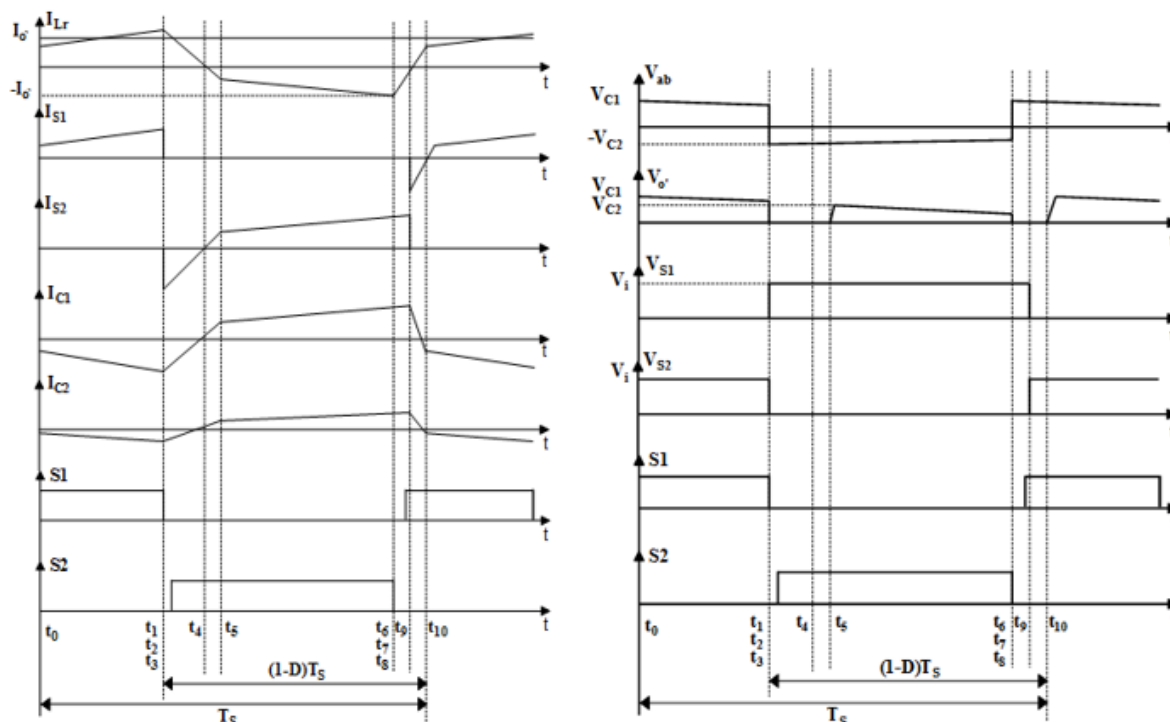


Figura 26 - Formas de onda do conversor meia-ponte  
Fonte: Adaptado de Barbi, Ivo, 1999.

## 3.4 FORMAS DE OPERAÇÃO E CONTROLE, CONVERSOR SIMPLIFICADO

Através da topologia Cuk *three-port* (Figura 10) é possível fazer uma análise simplificada do funcionamento do conversor em todas as suas situações de operação. Para o projeto o conversor deve ser capaz de funcionar em 5 modos de operação: módulo fotovoltaico alimentando a carga e a bateria; módulo fotovoltaico alimentando apenas a carga (bateria desconectada); módulo fotovoltaico alimentando somente a bateria (carga desconectada); módulo fotovoltaico e bateria alimentando a carga; e, por fim, apenas a bateria alimentando a carga. A seguir, têm-se as explicações para

cada modo de operação do conversor simplificado, onde  $V_1$  é o módulo fotovoltaico e  $V_2$  é a bateria.

### 3.4.1 Modo 1: módulo fotovoltaico alimentando somente a carga

Nesta situação tem-se o conversor atuando como um conversor *Boost* sobre a carga, uma vez que o lado conectado à bateria não estará em funcionamento. Conforme mostra a Figura 27. A tensão de saída para carga continua seguindo a equação 3.7.

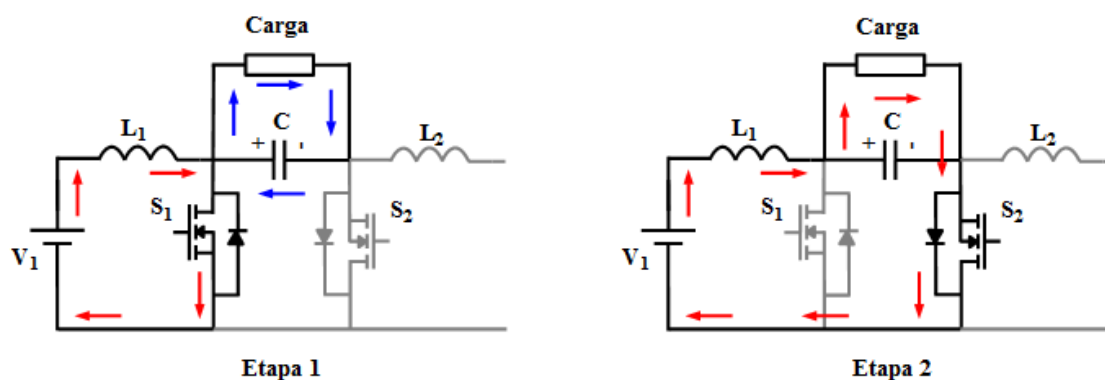


Figura 27 - Modo 1 de operação do conversor  
Fonte: Autoria própria.

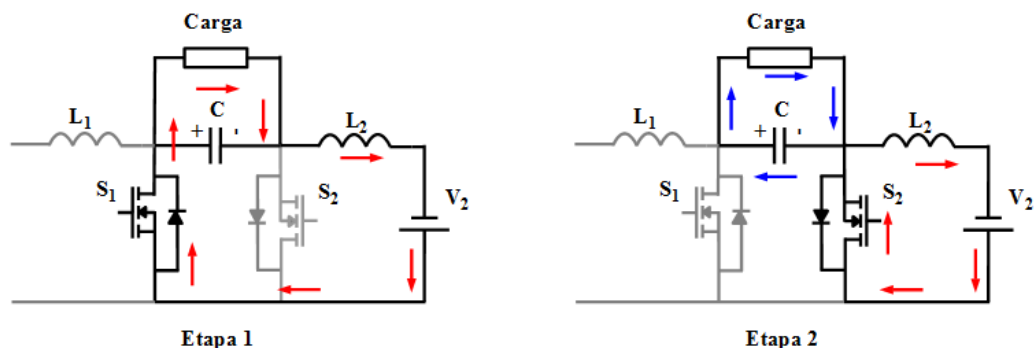
Este modo de operação pode ocorrer sob duas circunstâncias: a primeira ocorre quando a bateria está totalmente carregada e ainda há energia no módulo fotovoltaico, de forma que a bateria é desconectada e o módulo continua a fornecer energia a carga. A segunda é quando a bateria se encontra descarregada, e o módulo está gerando apenas a energia suficiente para alimentar a carga, de forma que não há fluxo de energia para a bateria.

O controle a ser empregado nesta forma de operação pode ser baseado na tensão de saída, de forma a mantê-la o mais constante possível.

### 3.4.2 Modo 2: bateria alimentando a carga

Esta situação ocorre quando não há luz solar, portanto, não há geração de energia no módulo fotovoltaico. Na mesma tem-se o conversor atuando da mesma

maneira que na situação anterior, com a única diferença de que a fonte de entrada é a bateria ao invés do módulo fotovoltaico, como mostra a Figura 28.

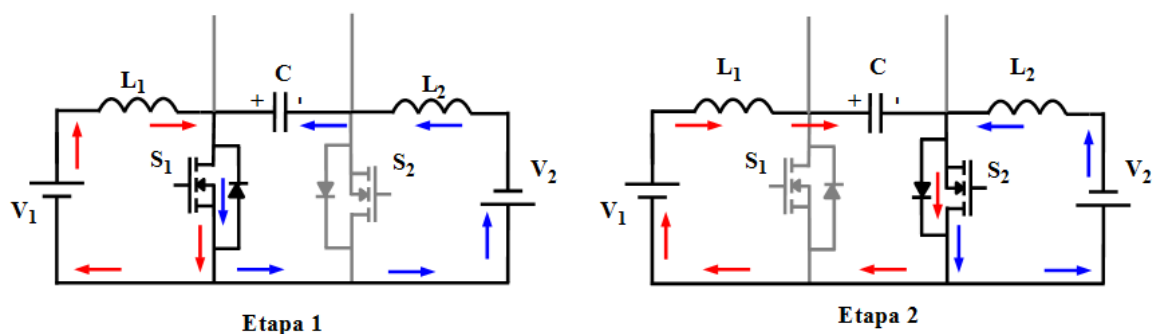


**Figura 28 - Modo 2 de operação do conversor**  
Fonte: Autoria própria.

O controle no modo 2 de operação se mantém o mesmo, controlando-se a tensão de saída na carga.

### 3.4.3 Modo 3: sistema fotovoltaico alimentando a bateria

Nesta situação tem-se o conversor funcionando como um Cuk bidirecional, conforme mostra a Figura 29.



**Figura 29 - Modo 3 de operação do conversor**  
Fonte: Autoria própria.

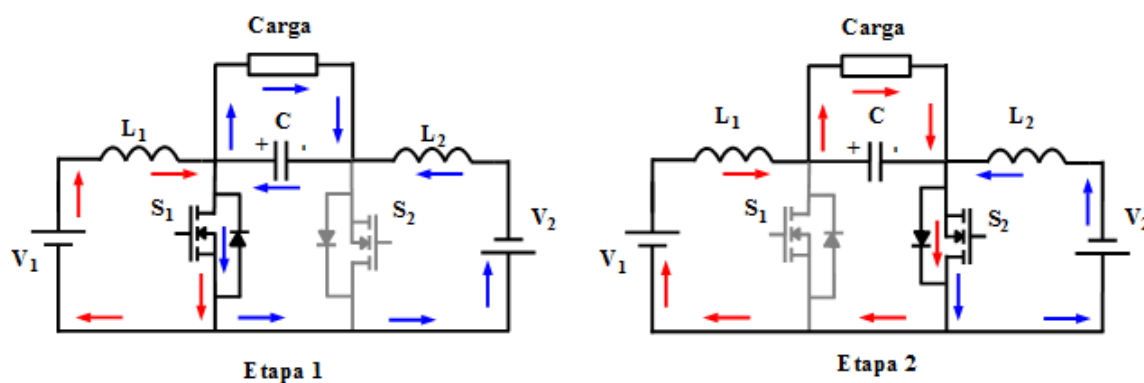
Quando não estiver conectado o computador portátil ao sistema, pode ocorrer esta situação onde havendo energia no módulo fotovoltaico e a bateria necessitando de carga, haverá a transmissão da energia do módulo para bateria.

Para este modo de operação dois controles são possíveis de serem empregados. Uma opção é que a máxima corrente do módulo seja igual a permissível

para carregar a bateria de forma que pode ser empregado o controle do MPPT do módulo fotovoltaico. A outra opção é de se empregar o controle da corrente da bateria de forma que a mesma não ultrapasse os limites adequados. Desta forma o controle do conversor se torna mais complexo, mas permite que o conversor seja mais eficiente em carregar a bateria.

#### 3.4.4 Modo 4: sistema fotovoltaico alimentando a carga e a bateria

Para esta situação o capacitor será carregado quando a chave  $S_2$  estiver conduzindo, e, quando a chave  $S_1$  passar a conduzir, o capacitor passará a alimentar a carga e a bateria, como pode-se observar na Figura 30.



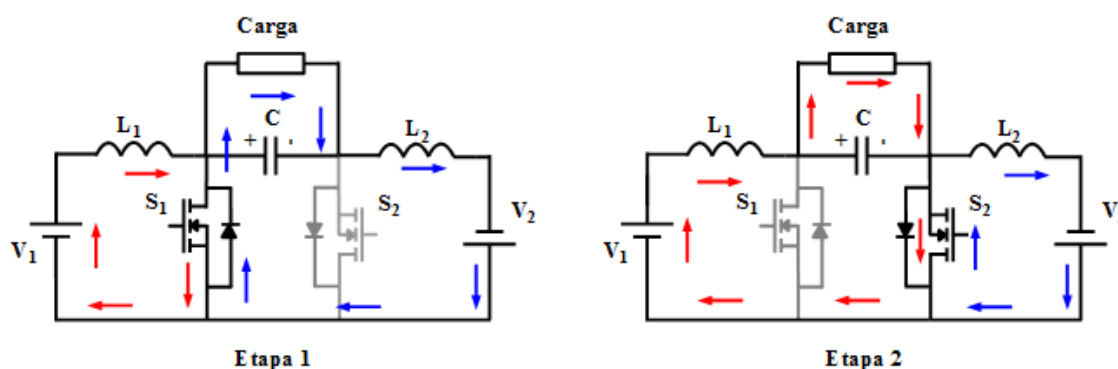
**Figura 30 - Modo 4 de operação do conversor**  
Fonte: Autoria própria.

Quando o módulo estiver próximo da sua máxima potência de geração, o mesmo estará comportando alimentar tanto a carga quanto carregar a bateria, ocorrendo assim o modo de operação 4. Neste caso, um tipo de controle que pode ser empregado é o MPPT para o módulo, a fim de extrair a maior potência possível do mesmo.

#### 3.4.5 Modo 5: módulo fotovoltaico e bateria alimentando a carga

Por fim, nesta última situação (Figura 31) tem-se tanto a fonte  $V_1$  (módulo fotovoltaico) alimentando a carga, quanto à fonte  $V_2$  (bateria).





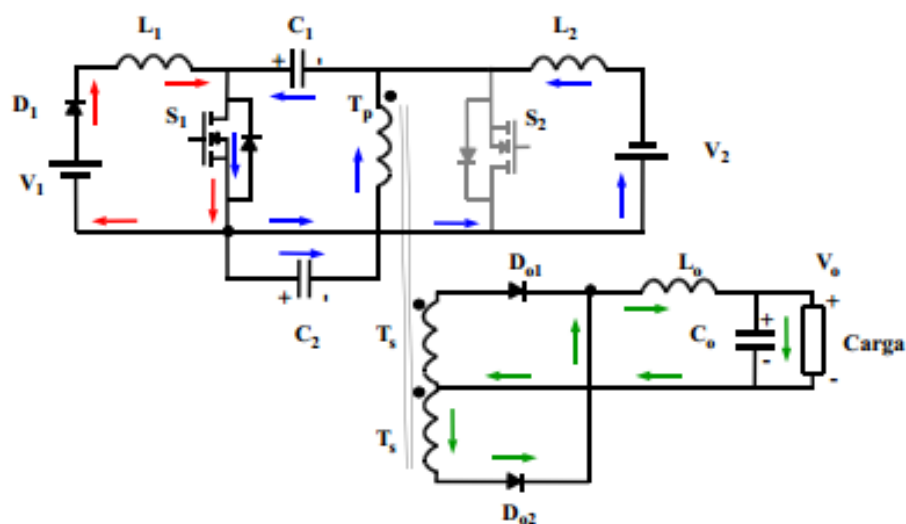
**Figura 31 - Modo 5 de operação do conversor**  
**Fonte: Autoria própria.**

Esta situação irá ocorrer quando o módulo fotovoltaico não estiver gerando energia suficiente para alimentar a carga, passando então a bateria a fornecer energia de forma suplementar.

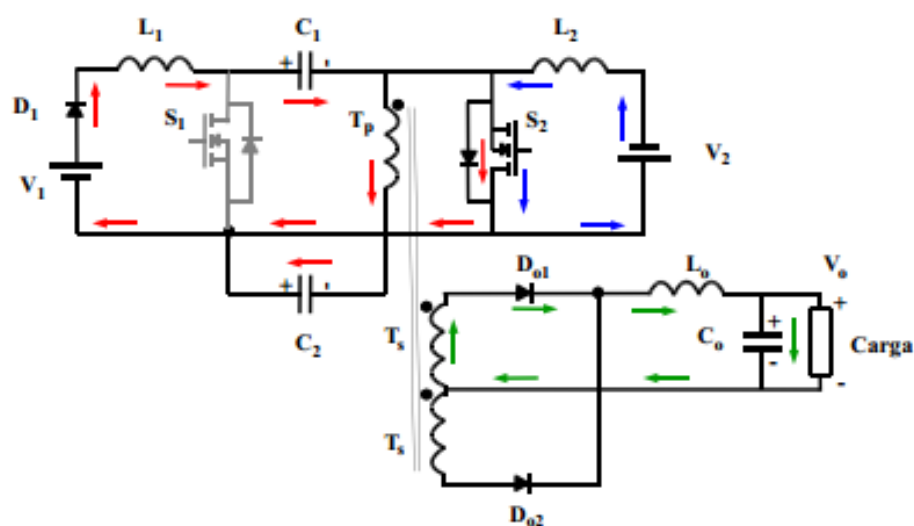
Assim como no modo de operação anterior, uma sugestão de controle é o MPPT para esta situação.

### 3.5 FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR PROPOSTO

A Figura 32 traz uma das formas de funcionamento do conversor. As demais formas de funcionamento apresentam-se demonstradas, na topologia simplificada, na seção 3.4.



Etapa 1



Etapa 2

**Figura 32 - Funcionamento da topologia proposta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na primeira etapa, a energia do módulo ( $V_1$ ) é armazenada no indutor  $L_1$ , enquanto que os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  alimentam o transformador e a bateria ( $V_2$ ). Ainda nesta etapa tem-se a saída do secundário pelo enrolamento inferior do transformador para alimentar a carga.

Na segunda etapa a energia armazenada em  $L_1$  juntamente com o módulo fotovoltaico ( $V_1$ ) carregam os Capacitores  $C_1$  e  $C_2$ . Enquanto que  $L_2$  carrega  $V_2$

(bateria). Já na saída do transformador tem-se a corrente circulando pelo enrolamento superior, para alimentar a carga, conforme mostrado na Figura 32.

Na Figura 33 têm-se as formas de onda ideais para o conversor escolhido.

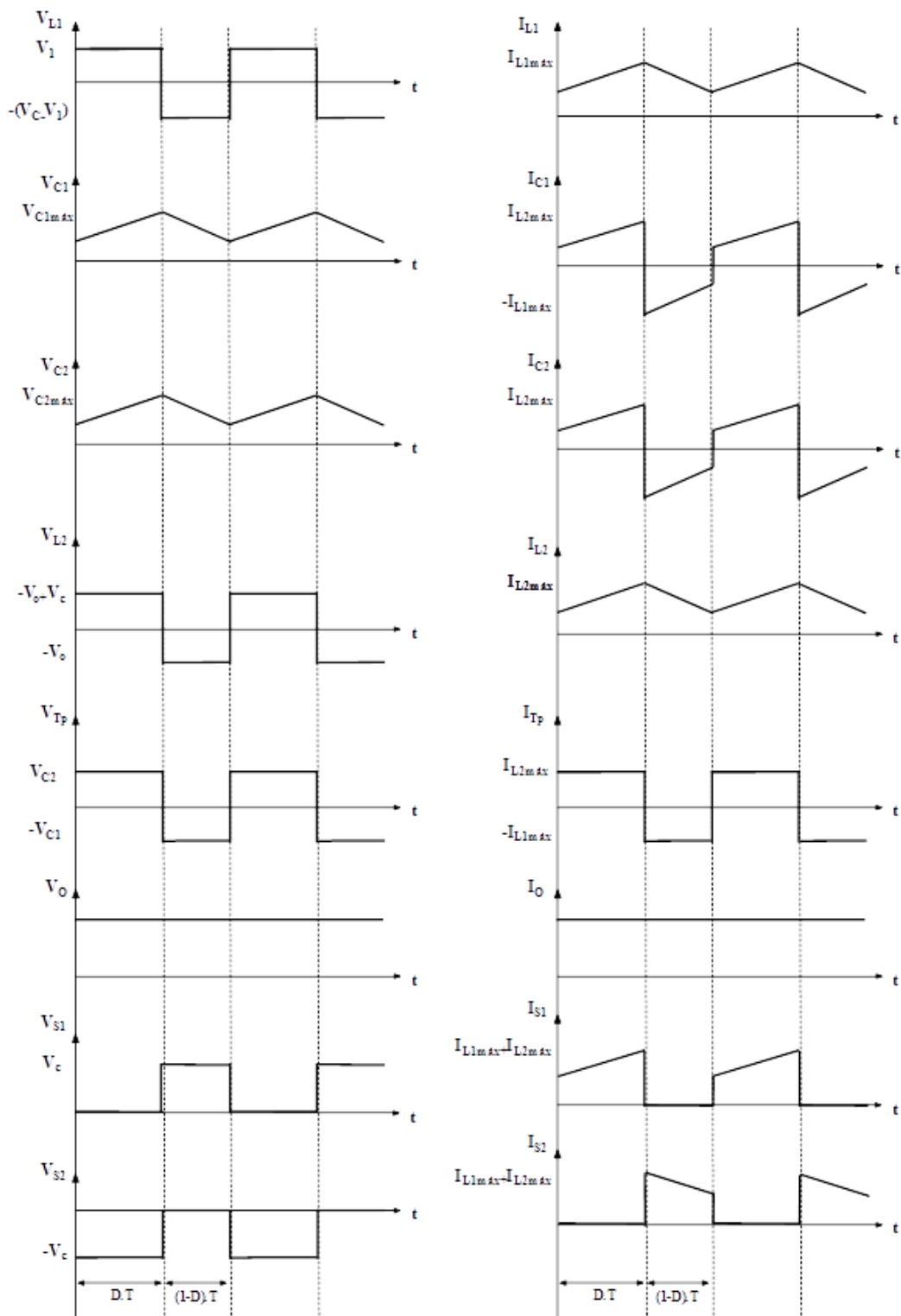


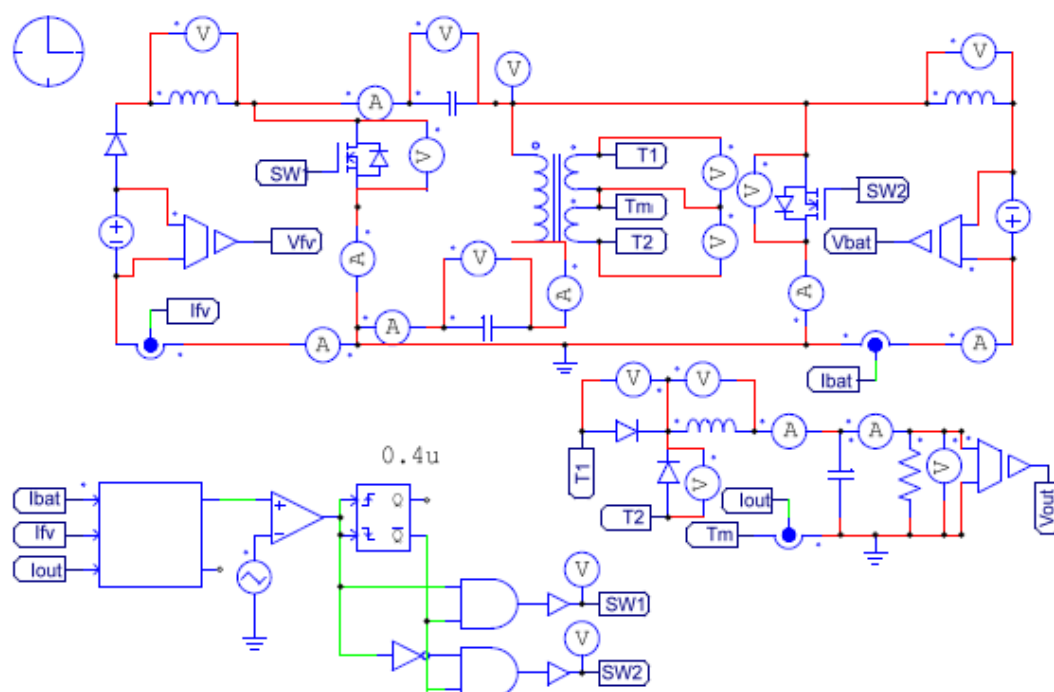
Figura 33 - Formas de onda do conversor  
Fonte: Autoria própria.

### 3.6 CONCLUSÃO

Ao se analisar as topologias *three-port* possíveis de serem utilizadas no conversor, chegou-se à uma topologia nova, baseada nos conversores Cuk bidirecional e meia-ponte ZVS com comando assimétrico. Para o melhor entendimento da topologia escolhida, foram explicitados os dois conversores, e foi apresentada a operação do conversor, que se dá de cinco modos diferentes.

## 4 SIMULAÇÃO

Dando-se sequência aos estudos para este projeto, foi realizada uma simulação a fim de analisar o funcionamento do conversor. Pelo fato de uma das entradas deste conversor ser uma bateria faz-se necessário a implantação de um controle com o objetivo de manter o conversor estável. Logo, para estas análises da simulação utilizou-se um controle de corrente para a entrada do módulo fotovoltaico. Na Figura 34, está representada a implementação da topologia no software PSIM, o qual foi utilizado para as simulações.

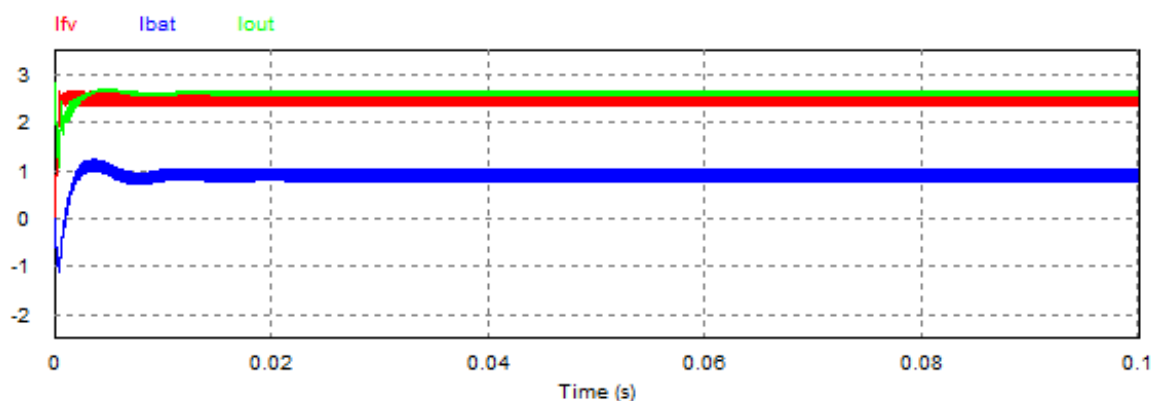


**Figura 34 - Implementação da topologia proposta no software PSIM**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 4.1 SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR

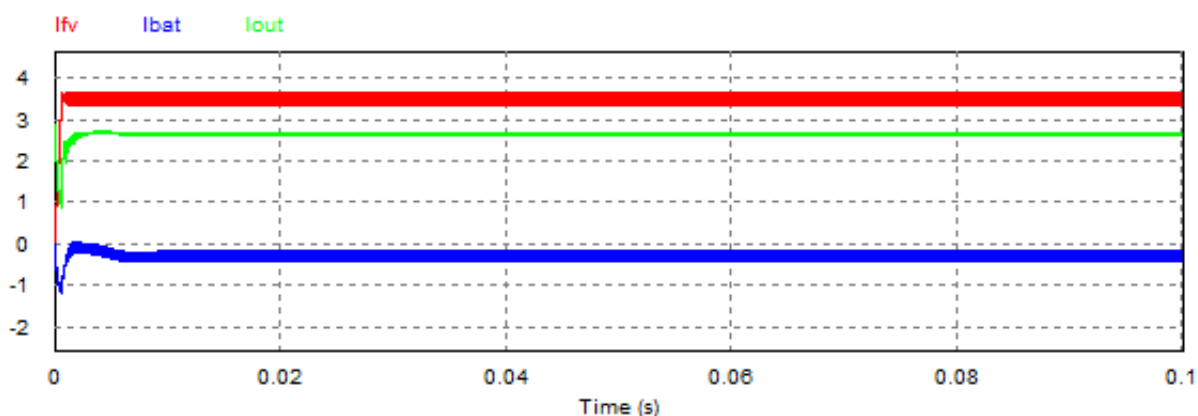
Uma das principais preocupações com relação ao funcionamento do conversor seria quanto ao fluxo de potência no mesmo, considerando-se um controle de apenas uma variável. Portanto, a primeira análise da simulação foi realizada a partir dos dois modos de operação mais complexos do conversor (modos 4 e 5) a fim de

averiguar se este fluxo de potência seria processado de maneira adequada. A Figura 35 apresenta o resultado obtido com a simulação para o modo de operação 5.



**Figura 35 - Simulação em modo de operação 5**  
Fonte: Autoria própria.

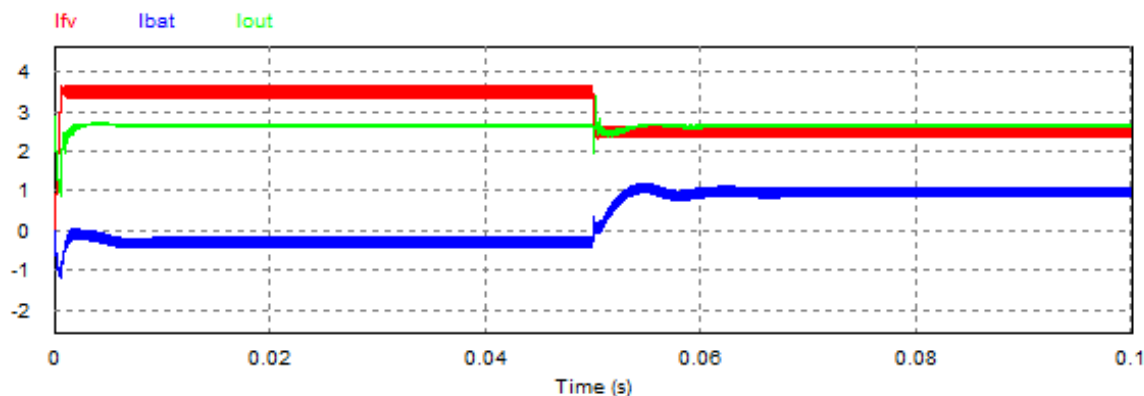
A partir dos resultados obtidos constata-se que a topologia está funcionando adequadamente no modo 5, onde tanto o módulo como a bateria alimentam a carga. Portanto, há uma corrente com valor positivo saindo da bateria, pois a mesma encontra-se em funcionamento como fonte. Aumentando-se a referência de corrente para o controle pretende-se que o módulo fotovoltaico passe a transferir mais energia e, dessa forma, torna-se capaz de alimentar sozinho tanto a bateria como a carga. A Figura 36 mostra os resultados obtidos com este aumento da corrente de referência.



**Figura 36 - Simulação em modo de operação 4**  
Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar o resultado obtido para o modo de operação 4 tem-se que o fluxo de energia é controlado e flui adequadamente conforme é requisitado pela carga. Desta forma conclui-se que a operação do conversor em cada um de seus modos de operação são possíveis de serem alcançados.

Outro teste realizado em simulação foi o da transição entre modos de operação afim de averiguar como a mesma afetaria o comportamento do conversor. O resultado obtido desta simulação é mostrado na Figura 37.



**Figura 37 - Simulação da transição do modo 4 para o 5**  
**Fonte: Autoria própria**

Notou-se que a transição dos modos de operação não acarreta nenhum risco ao sistema, uma vez que são facilmente controlados através da malha de controle de corrente, assegurando a possibilidade de execução do conversor.

Determinado o comportamento do conversor, foram simuladas as formas de onda nos vários componentes do circuito para efeito comparativo entre as formas de ondas teóricas e as formas de onda simuladas. Constatou-se que as formas de onda obtidas na simulação correspondiam às idealizadas (Figura 33, seção 3.5), de maneira que se concluiu esta etapa de simulação e se iniciou a montagem do protótipo, que é abordado no próximo capítulo.

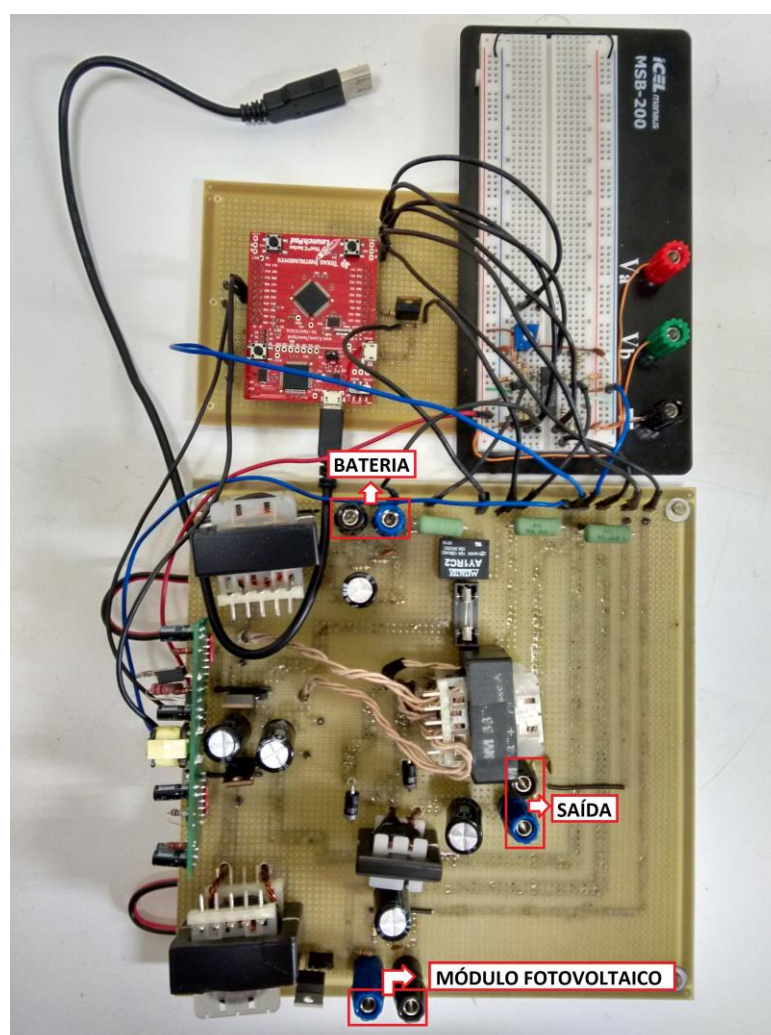
## 4.2 CONCLUSÃO

Após a determinação do conversor a ser utilizado, foram realizadas simulações a fim de verificar se o mesmo segue o funcionamento proposto. A partir destas simulações, onde foi analisado o comportamento da corrente das entradas e saídas do conversor, verificou-se que este é apto para a etapa de montagem.

## 5 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Sendo verificado o funcionamento do conversor a partir das simulações, passou-se então para a montagem do protótipo.

Na Figura 38, tem-se o protótipo que foi desenvolvido do conversor apresentado neste trabalho.



**Figura 38 - Protótipo do conversor**  
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 38, pode-se observar as entradas e saídas do conversor. Com o propósito de facilitar as medições, foi retirada a isolamento galvânica, aterrando a saída junto à entrada. Os componentes empregados na montagem deste protótipo foram separados em elementos de potência e de controle, e sua explanação se dará na sequência.



## 5.1 COMPONENTES DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

As variáveis consideradas e seus respectivos valores se encontram na Tabela 1.

<b>Siglas</b>	<b>Parâmetros do conversor</b>	<b>Valores</b>
$f_s$	Frequência de chaveamento	40 kHz
$V_1$	Tensão do módulo fotovoltaico	15 V
$V_2$	Tensão da bateria	12 V
$V_o$	Tensão da saída	19 V
$I_1$	Corrente do módulo fotovoltaico	5 A
$I_2$	Corrente da bateria	4 A
$I_o$	Corrente da saída	2,5 A
$\Delta I_1$	Variação da corrente $I_1$	20%
$\Delta I_2$	Variação da corrente $I_2$	20%
$\Delta I_o$	Variação da corrente $I_o$	20%
$\Delta V_1$	Variação da tensão $I_1$	12%
$\Delta V_2$	Variação da tensão $I_2$	10%
$\Delta V_o$	Variação da tensão $I_o$	5%
$V_{1máx}$	Tensão máxima do módulo fotovoltaico	16,8 V
$V_{1mín}$	Tensão mínima do módulo fotovoltaico	13,2 V
$V_{2máx}$	Tensão máxima da bateria	13,2 V
$V_{2mín}$	Tensão mínima da bateria	10,8 V
$V_{omáx}$	Tensão máxima da saída	19,95 V
$V_{omín}$	Tensão mínima da saída	18,05 V
$\Delta B_i$	Densidade de fluxo dos indutores	0,3 T
$J_i$	Densidade de corrente dos indutores	380 A/cm <sup>2</sup>
$K_w$	Fator para possibilidade de execução	0,7
$l_t$	Comprimento médio da espira	87 mm
$P_o$	Potência de saída	50 W
$H$	Rendimento	0,92
$K_p$	Fator de áreas do primário	0,41
$K_t$	Fator dependente do tipo de topologia	1
$K_u$	Fator de utilização das janelas	0,4
$K_v$	Fator de forma de onda	4
$B_o$	Densidade de fluxo do transformador	0,12 T
$J_o$	Densidade de corrente do transformador	250 A/cm <sup>2</sup>
$I_{LdRMS}$	Corrente eficaz na indutância de dispersão	3,6 A
$N$	Relação de transformação	1,44

**Tabela 1 - Parâmetros do conversor**

### 5.1.1 Dimensionamento dos indutores

Para ser realizada a construção dos indutores a serem utilizados no protótipo foi feito um dimensionamento (apêndice A), resultando nos valores de indutância apresentados a seguir.

$$L_1 = 0,188 \text{ mH} \quad (5.1)$$

$$L_2 = 0,188 \text{ mH} \quad (5.2)$$

$$L_o = 0,07 \text{ mH} \quad (5.3)$$

Sendo que os núcleos utilizados para os indutores foram E-42/21/15 para os indutores do módulo fotovoltaico e da bateria, e E-30/15/7 para o da saída, e o fio usado foi o AWG21 para todos.

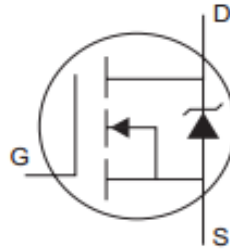
### 5.1.2 Dimensionamento do transformador

A fim de se obter um valor de tensão desejado na saída, foi necessária a utilização de uma relação de transformação de 1,44 no transformador, devido à diferença entre a tensão da bateria e do módulo em sua máxima potência e a tensão necessária para alimentar a carga.

O transformador foi construído utilizando-se de um núcleo EE-42/21/15 e de fio Litz, que é equivalente ao fio AWG 17, sendo o seu dimensionamento demonstrado no apêndice A.

### 5.1.3 Chaves de acionamento

Devido a disponibilidade e visando o rendimento, foram utilizados MOSFET's IRFZ48N para o chaveamento do conversor. Estas chaves apresentam uma resistência de apenas 16 mΩ, acarretando em menores perdas quando comparadas com as demais chaves disponíveis. Os valores de tensão ( $V_{DSm\acute{a}x}$ ) e corrente ( $I_{Dm\acute{a}x}$ ) suportados pela chave são 55 V e 64 A, que se apresentam adequados à faixa de valores do conversor. A estrutura deste MOSFET é apresentada na Figura 39.



**Figura 39 - Estrutura do IRFZ48N**  
**Fonte: International Rectifier HEXFET® Power MOSFET.**

A estrutura do MOSFET contém um diodo em antiparalelo, que dispensa a utilização de semicondutor externo.

#### 5.1.4 Capacitores

Para o dimensionamento dos capacitores foram utilizadas as seguintes fórmulas:

Capacitor 1 do conversor:

$$C_1 = D \cdot \frac{I_2}{\Delta V_2 \cdot f_s} \quad (5.4)$$

$$C_1 = 41,7 \mu\text{F} \quad (5.5)$$

Capacitor 2 do conversor:

$$C_2 = \frac{I_o \cdot 1,44 \cdot D}{\Delta V_2 \cdot f_s} \quad (5.6)$$

$$C_2 = 37,5 \mu\text{F} \quad (5.7)$$

Capacitor de saída do conversor:

$$C_o = \frac{\Delta I_o}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f_s} \quad (5.8)$$

$$C_o = 1,6 \mu\text{F} \quad (5.9)$$

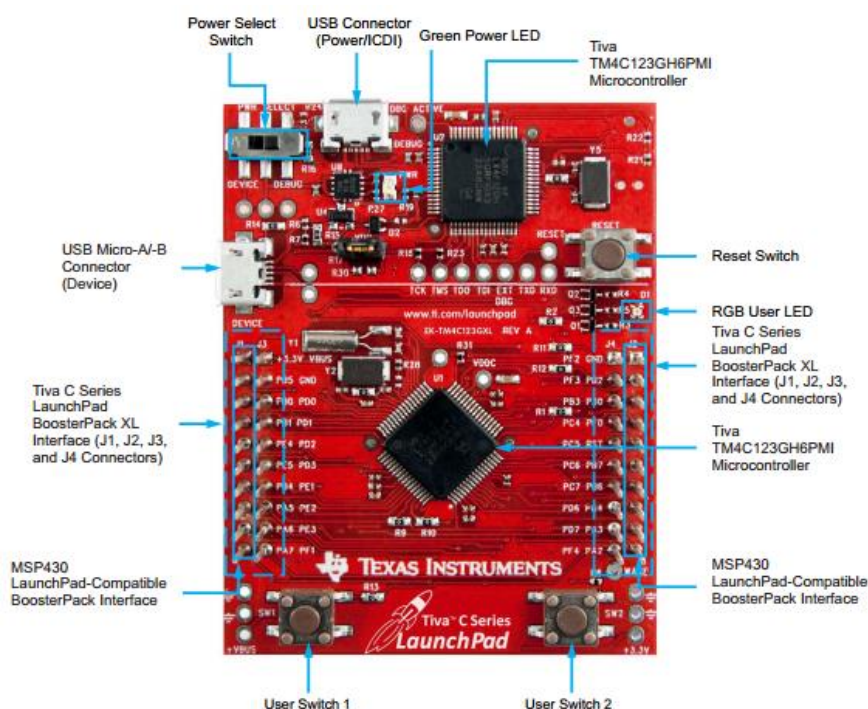
Como os valores obtidos foram elevados e os capacitores capazes de atender a tais valores são eletrolíticos, a escolha então se baseou no capacitor de maior capacidade de condução de corrente disponível a fim de garantir uma maior vida útil do conversor. Deste modo, foi utilizado um valor de 1000  $\mu\text{F}$  para o capacitor  $C_1$  e para o  $C_2$ , e um valor de 470  $\mu\text{F}$  para o capacitor  $C_o$ .

## 5.2 COMPONENTES DO CIRCUITO DE CONTROLE

Para a realização do controle deste conversor foram utilizados 2 AD's (conversores analógico-digitais) e 2 saídas de PWM, provenientes do kit Tiva™ LaunchPad. Também foram empregados o driver que realiza o acionamento dos MOSFET's, filtros na entrada do módulo fotovoltaico, na saída para a carga, e na bateria, e os amplificadores. A seguir está a descrição de cada um destes elementos.

### 5.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado neste projeto foi o Tiva™ TM4C123GH6PMI, presente no kit de desenvolvimento Tiva™ LaunchPad da Texas Instruments (Figura 40).



**Figura 40 - Kit Tiva™ LaunchPad**

Fonte: Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board User's guide.

Este processador é um Cortex™ - M4 de 32 bits. Ele opera em 80 MHz, possui uma resolução de conversão analógica para digital de 12 bits, além de realizar tratamento de interrupção rápida.

Outra característica importante que fundamentou a escolha do Tiva™ para este trabalho foi a presença de MCU com ponto flutuante, já que o mesmo pôde ser utilizado nos cálculos sem gerar um gasto elevado de tempo de processamento.

Para realizar o controle dos sinais, a programação foi feita no *software* Code Composer Studio, onde foi elaborado o controle e sintonizado os termos proporcional e integral para a análise do circuito em malha fechada. O programa foi transmitido então ao Tiva™ pelo conector micro USB presente no kit.

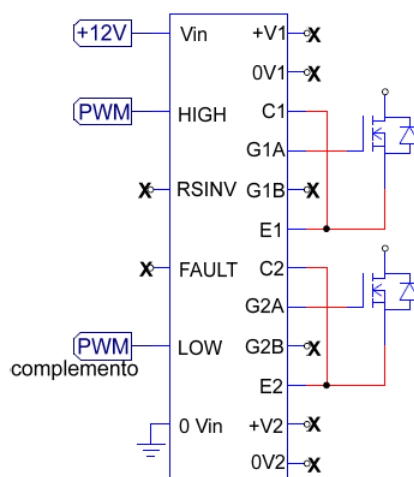
### 5.2.2 Driver de acionamento das chaves

Para possibilitar o acionamento das chaves é necessário uma interface entre o processador com a chave, pois a tensão máxima fornecida pelo Tiva é 3,3 V. Para realizar essa interface foi utilizado o drive DRVHCPL(2R1) da NHS, mostrado na Figura 41.



**Figura 41 - Driver de acionamento das chaves**  
Fonte: Autoria própria.

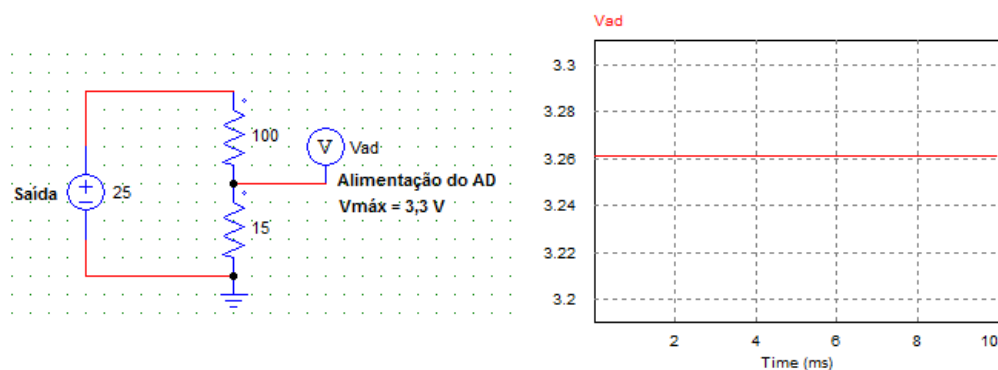
Um dos principais motivos para a escolha deste foi a possibilidade de realizar o acionamento mantendo a referência do circuito no menos da entrada do módulo fotovoltaico. Para realizar o acionamento das chaves com este driver foi realizado a conexão segundo mostrado no diagrama da Figura 42.



**Figura 42 - Diagrama de ligação do DRVHCPL(2R1)**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 5.2.3 Amplificadores e divisores de tensão

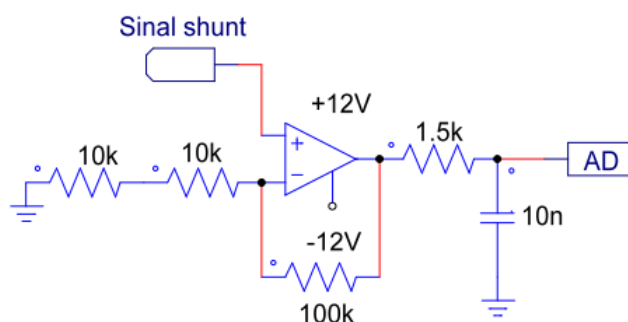
Para a aquisição dos valores de tensão e corrente do conversor pelo Tiva™, fez-se necessário o tratamento desses sinais. Primeiramente para as medições de tensão é necessário realizar uma redução deste valor uma vez que o limite de tensão lido pelo AD do Tiva™ é de 3,3 V. Portanto, empregou-se divisores resistivos, que são associações de resistores dispostos de forma que o valor de tensão medido em cima de um deles represente o valor aplicado ao conversor, conforme mostrado na Figura 43.



**Figura 43 - Divisor resistivo da saída**  
**Fonte: Autoria própria.**

Neste caso os resistores foram dimensionados de forma que a tensão que vai para o conversor analógico-digital seja de no máximo 3,3 V, pois, caso exceda essa tensão, a entrada do AD pode queimar, motivo pelo qual foi escolhido um valor de tensão na saída maior do que o real (19 V). Deste mesmo modo foram empregados divisores resistivos à entrada do módulo fotovoltaico e à bateria, variando apenas nos valores de resistores utilizados.

Para a aquisição do valor de corrente foi utilizado resistor shunt, portanto, os valores de tensão obtidos no mesmo são muito pequenos, o que faz com que seja necessário ampliá-los de forma a evitar erros na leitura do AD, devido aos valores serem muito próximos ao fundo de escala. Como solução este sinal foi amplificado através do circuito mostrado na Figura 44.



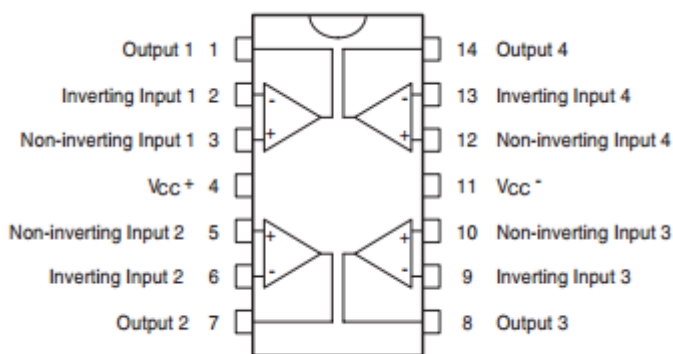
**Figura 44 - Amplificador não inversor com filtro passa-baixa**  
**Fonte: A autoria própria.**

A fim de determinar os resistores utilizados no circuito amplificador, o ganho foi calculado segundo a equação a seguir:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5.10)$$

Onde  $R_2$  é igual a 100 k $\Omega$  e  $R_1$  é igual a 20 k $\Omega$  (associação dos dois resistores de 10 k $\Omega$ ).

Para realizar o circuito amplificador foi utilizado um LM324N, o qual possui 4 amp-op's, conforme a Figura 45.



**Figura 45 - Estrutura do LM324N**

Fonte: STMicroelectronics Low power quad operational amplifiers.

Na saída do amplificador pode-se observar um filtro RC, cuja descrição se encontra no item 5.2.4.

#### 5.2.4 Filtros

Com a finalidade de evitar os ruídos, provenientes do chaveamento, nos sinais enviados ao AD foram empregados filtros RC na saída dos sinais tratados nos amplificadores e acrescentados capacitores aos divisores resistivos.

O filtro RC atua retendo os ruídos de alta frequência que são indesejáveis para as leituras dos sinais. No conversor, a alta frequência que se deseja filtrar é a de chaveamento, que é da ordem de 40 kHz. A frequência de corte deve ser inferior à metade da frequência de chaveamento, de modo que essa seja retida.

Na entrada do módulo fotovoltaico foi acrescentado um capacitor de 1000  $\mu\text{F}$  para evitar a interferência de ruídos vindos da fonte utilizada para a realização dos testes. E também foi empregado um capacitor de 470  $\mu\text{F}$  na bateria com o objetivo de manter a tensão estável.

### 5.3 CONCLUSÃO

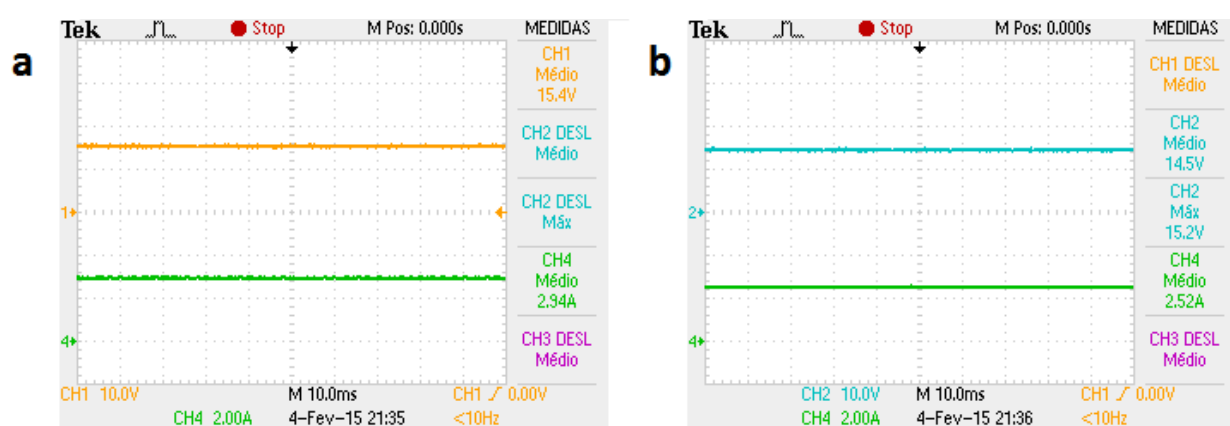
Neste capítulo foram tratados todos os elementos necessários para a montagem do protótipo do conversor, tanto da parte de potência como a de controle. Foram apresentados dimensionamentos, descrição e justificativa para o uso de certos componentes e o conversor construído.



## 6 ANÁLISE DE RESULTADOS

O conversor foi implementado primeiramente para o modo 1 de funcionamento, onde a energia é transferida do módulo fotovoltaico para a carga (item 3.4.1).

As formas de onda “a” e “b” (Figura 46) apresentam a tensão (amarelo) e corrente (verde) da entrada do módulo fotovoltaico e a tensão (azul) e a corrente (verde) da saída do conversor, respectivamente.

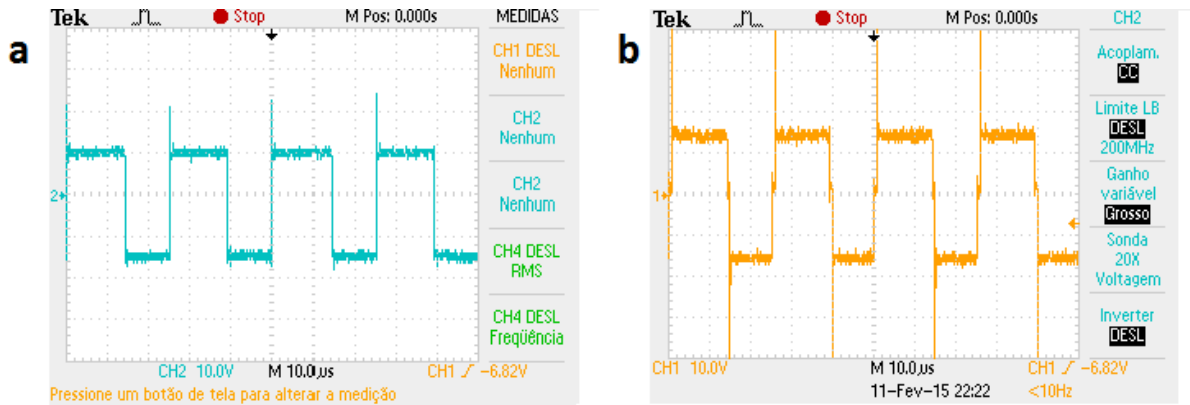


**Figura 46 -  $V_1$  e  $I_1$  (a), e  $V_o$  e  $I_o$  (b)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se observar que a tensão de saída não atingiu o valor esperado (19 V) tanto neste quanto nos outros modos de operação. As possíveis causas para o baixo valor de tensão de saída são: as perdas nos diodos na saída do secundário, que não foram levadas em consideração no dimensionamento do transformador, sendo que esta queda varia entre 1 e 1,7 V por diodo; a indutância de dispersão também provoca uma redução de tensão, devido a uma redução do aproveitamento da modulação do PWM, de modo que o valor determinado da razão cíclica ( $D$ ) determinada não é o efetivo.

No entanto, levando-se em consideração essas perdas no início do projeto do transformador, pode-se ajustar a sua relação de transformação de modo que se atinja a tensão nominal na saída, resolvendo assim o problema do *offset* de tensão.

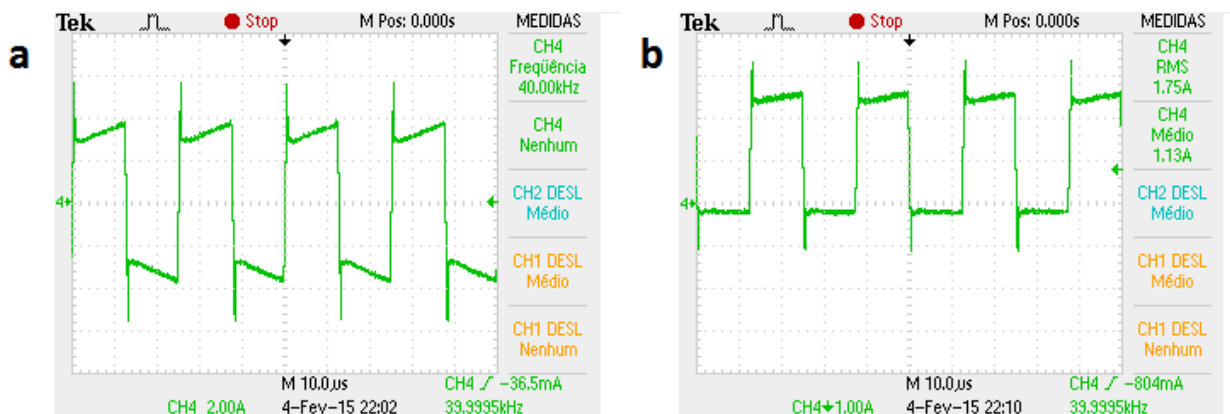
As formas de onda da Figura 47 apresentam a tensão para o primário e secundário do transformador.



**Figura 47 -  $V_{Tp}$  (a), e  $V_{Ts}$  (b)**  
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a tensão no secundário é superior à do primário devido à relação de transformação de 1,44 empregada ao transformador.

A Figura 48 em seguida mostra as formas de onda de corrente do primário (a) e de um dos secundários (b) do transformador.



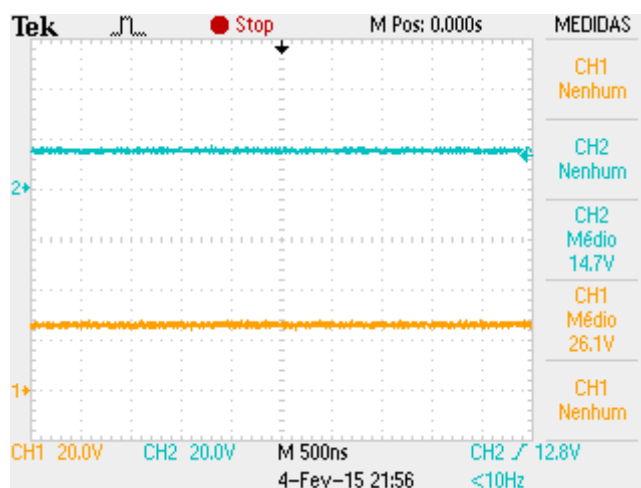
**Figura 48 -  $I_{Tp}$  (a), e  $I_{Ts}$  (b)**  
Fonte: Autoria própria.

Observando-se os dois gráficos pode-se notar que a corrente do primário do transformador varia de 4 A a -4 A aproximadamente. E, quando é refletida para um dos secundários, é possível observar que em “b” a corrente medida não possui a componente negativa, devido à retificação realizada pelos diodos na sequência. Devido à relação de transformação, tem-se a redução do valor máximo da corrente comparado ao primário.

Também é possível observar em “a” que a frequência de comutação do conversor é de 40 kHz, conforme proposto no projeto.

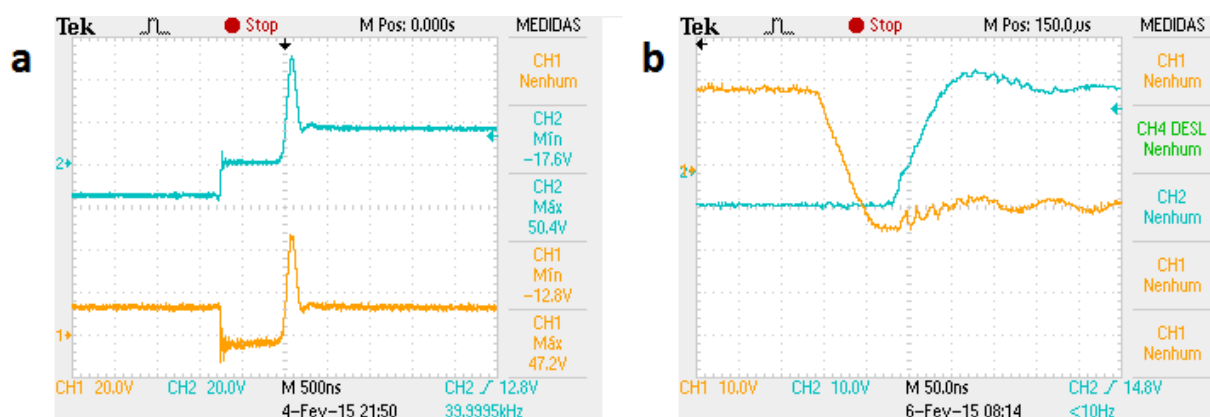
A Figura 49 mostra a tensão presente no capacitor em série com o transformador,  $V_{C2}$  (azul) e no capacitor entre as chaves,  $V_{C1}$  (amarelo). Em

comparação com a forma de onda idealizada, estas não apresentam oscilações. Isto pode ser justificado pelo superdimensionamento dos capacitores, que torna a tensão constante.



**Figura 49 -  $V_{C2}$  e  $V_{C1}$**   
Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 mostra as formas de onda de tensão com relação ao anodo e catodo do diodo  $D_{o1}$  da retificação, onde a onda de tensão no anodo está representada pela cor azul e a no catodo está representada pela cor amarela (a).



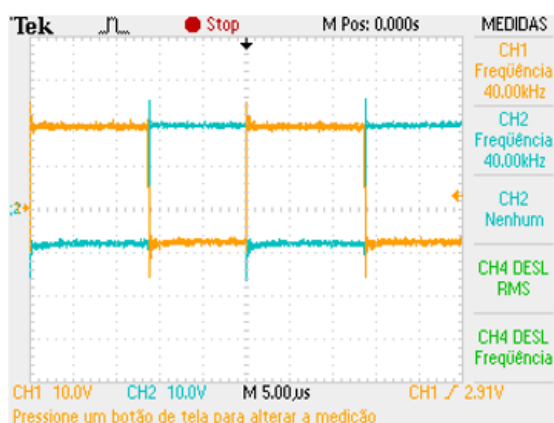
**Figura 50 - Tensão no anodo e no catodo de  $D_{o1}$**   
Fonte: Autoria própria.

O pico de tensão observado é possivelmente ocasionado pela indutância de dispersão. Além disso, o comprimento das trilhas utilizadas nas ligações dos componentes também pode ter afetado na sobretensão.

O gráfico em “b” representa o tempo morto do chaveamento, onde a onda em amarelo é a do sinal de  $S_1$ , e a em azul é a do sinal de  $S_2$ . Observa-se que o tempo

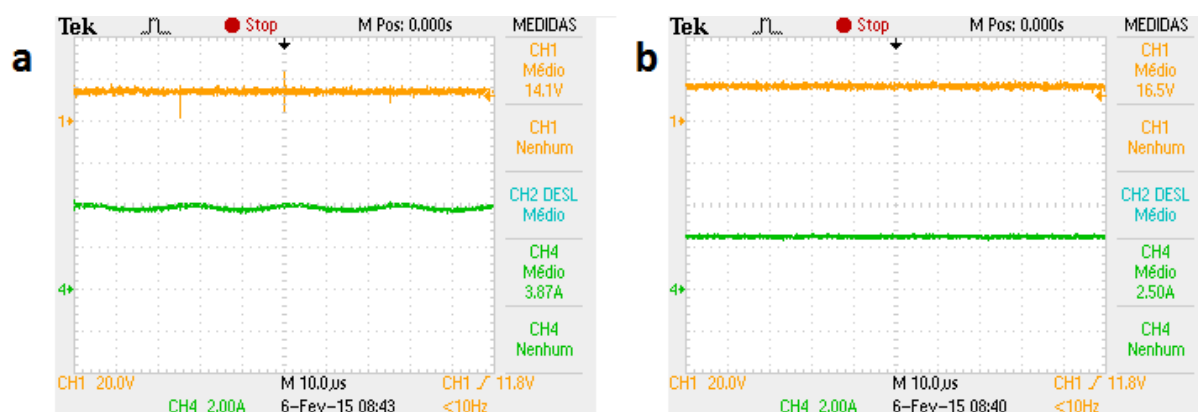
morto em “b” é menor do que o tempo morto observado em “a”. Um possível motivo para essa disparidade, como já falado anteriormente, é o efeito de dispersão que reduz o valor efetivo da modulação do PWM na saída do conversor.

Com respeito ao PWM assimétrico, o mesmo pode ser observado na Figura 51, onde pode-se constatar que as chaves atuam de modo complementar.



**Figura 51 - PWM assimétrico**  
Fonte: Autoria própria.

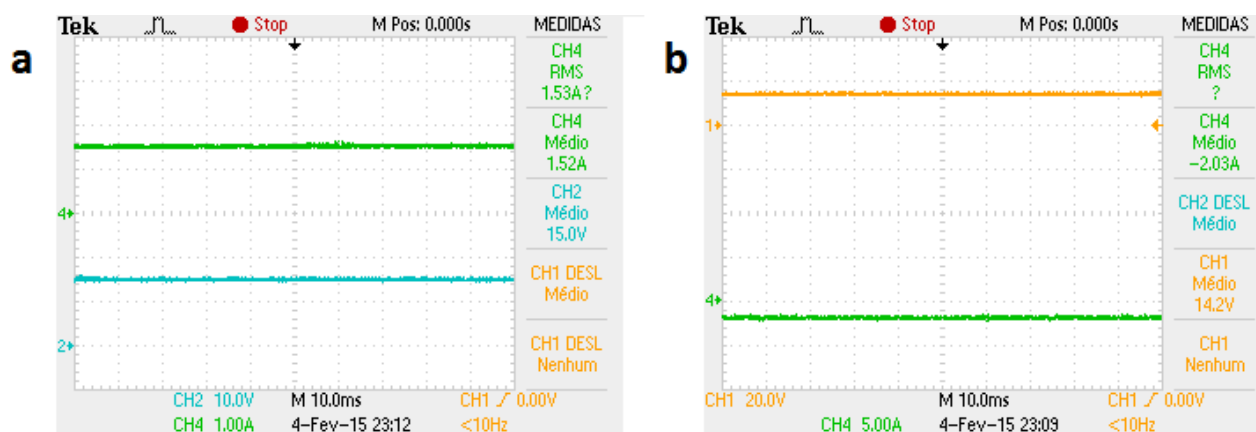
Para o modo 2 de operação (item 3.4.2), onde a bateria alimenta a carga, obtiveram-se os seguintes resultados, apresentados na Figura 52. Onde consta no gráfico “a” a tensão (amarelo) e a corrente (verde) presentes na bateria; e no gráfico “b” a tensão (amarelo) e a corrente (verde) presentes na saída.



**Figura 52 -  $V_2$  e  $I_2$  (a), e  $V_o$  e  $I_o$  (b)**  
Fonte: Autoria própria.

Observa-se em “b” que a corrente desejada na saída de 2,5 A foi alcançada, e, pelos dois gráficos, pode-se constatar que o conversor atua de maneira adequada.

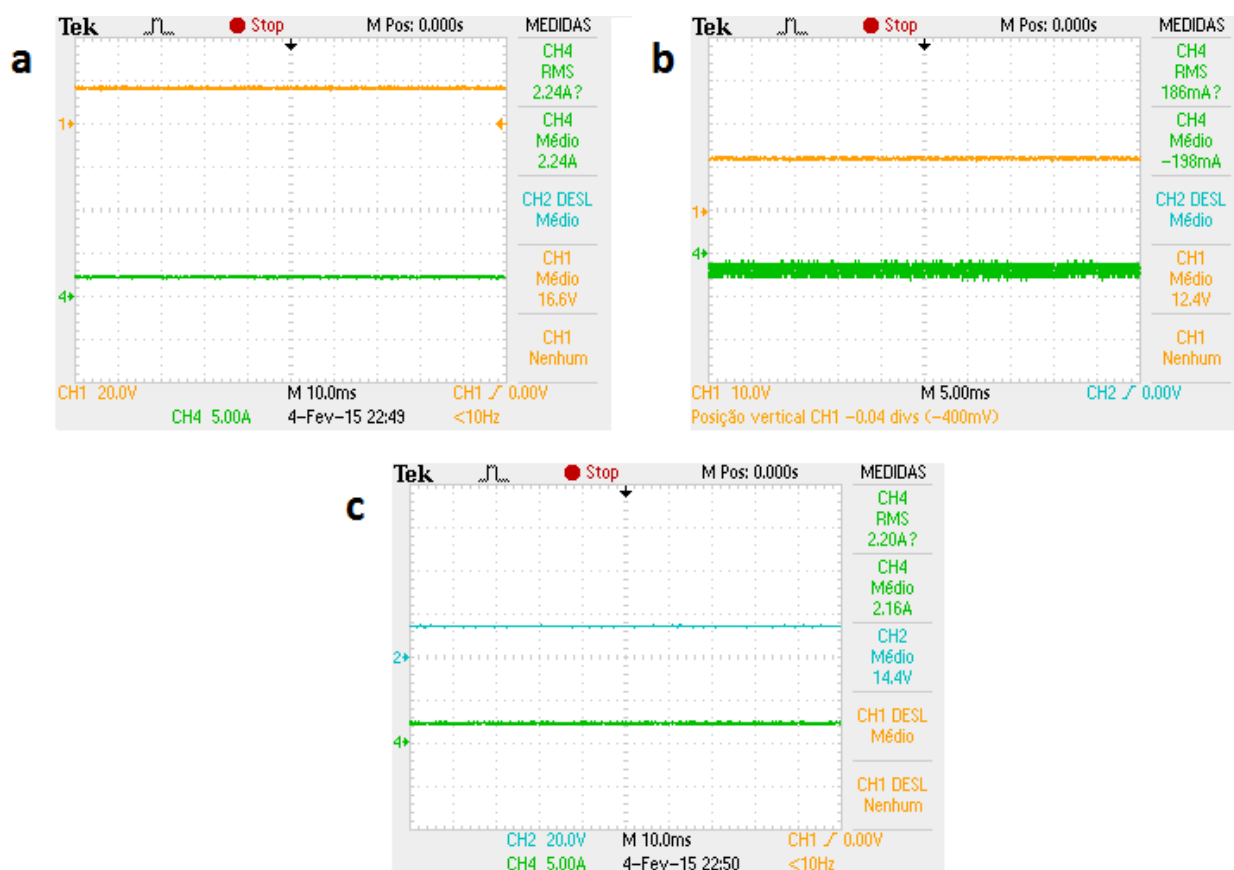
Na Figura 53, os gráficos “a” e “b” ilustram o módulo fotovoltaico alimentando a bateria sem a presença de carga (modo 3 de operação - item 3.4.3). Onde “a” indica a tensão (azul) e corrente (verde) da entrada do módulo fotovoltaico, e “b” indica a tensão (amarelo) e corrente (verde) da bateria.



**Figura 53 -  $V_1$  e  $I_1$  (a), e  $V_2$  e  $I_2$  (b)**  
Fonte: Autoria própria.

É possível verificar que o conversor conseguiu controlar a corrente que vai para a bateria, o que normalmente é uma preocupação, tendo em vista o comportamento instável da bateria. Porém verificou-se que a parametrização da leitura de corrente utilizada para os demais modos de operação não concidiu com a corrente dispensada neste modo. Não foi possível afirmar o motivo para essa disparidade na parametrização, sendo necessários outros estudos.

Já no modo de operação 4 (item 3.4.4), o sistema fotovoltaico fornece energia para a carga e para a bateria, representado pela Figura 54, onde é apresentado em “a” a tensão (amarelo) e a corrente (verde) de entrada do módulo fotovoltaico, em “b”, a tensão (amarelo) e corrente (verde) da bateria, e em “c”, a tensão (azul) e corrente (verde) de saída.



**Figura 54 -  $V_1$  e  $I_1$  (a),  $V_2$  e  $I_2$  (b), e  $V_o$  e  $I_o$  (c)**  
 Fonte: Autoria própria.

É possível averiguar o correto funcionamento do conversor neste modo de operação, já que o módulo fotovoltaico está fornecendo energia para a bateria e para o conversor. Observa-se também que a corrente presente na bateria ("b") possui um valor negativo, o que indica que ela está recebendo energia.

A Figura 55 a corrente em  $L_1$  (verde) e em  $L_2$  (rosa) demonstra o funcionamento do conversor em modo de condução contínua, sendo o valor da corrente no indutor  $L_2$  novamente negativo, pois o sentido da corrente se dá em prol de alimentar a bateria.

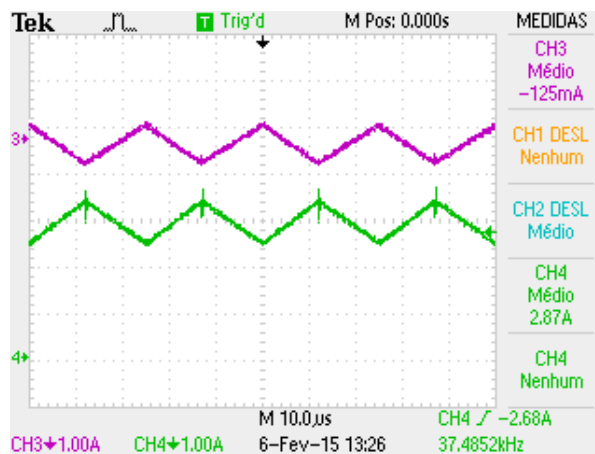


Figura 55 -  $I_{L1}$ , e  $I_{L2}$   
Fonte: Autoria própria.

Por último, no modo de operação 5 (3.4.5) a carga recebe energia tanto do módulo fotovoltaico quanto da bateria. A partir da Figura 56 pode-se observar em “a” a tensão (amarelo) e a corrente (verde) de entrada do módulo fotovoltaico, em “b”, a tensão (amarelo) e corrente (verde) da bateria, e em “c”, a tensão (azul) e corrente (verde) de saída.

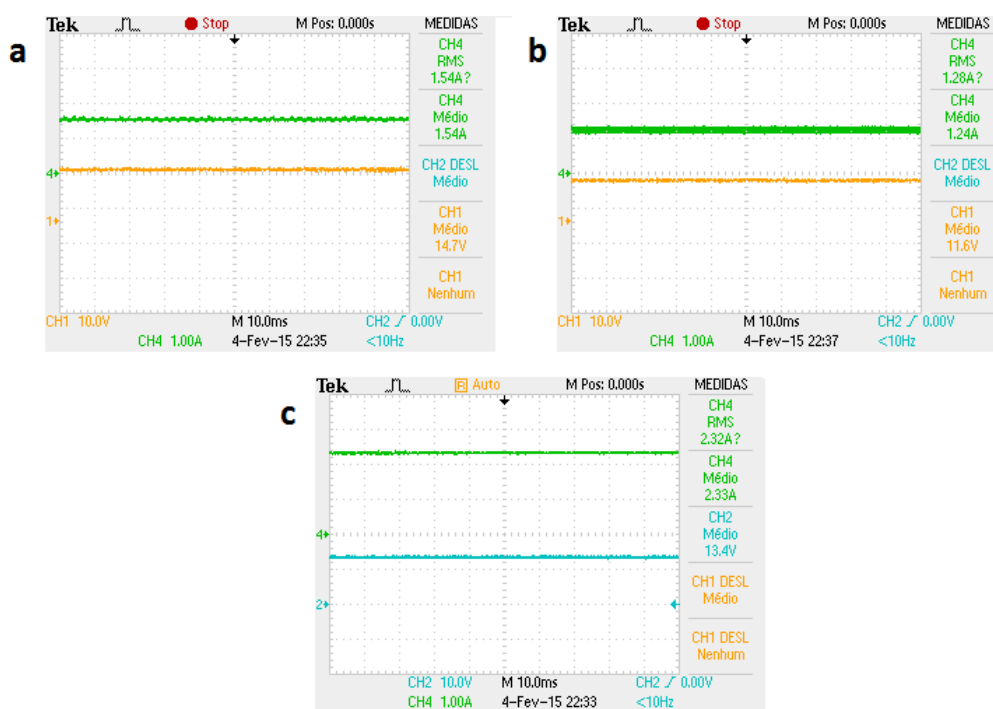
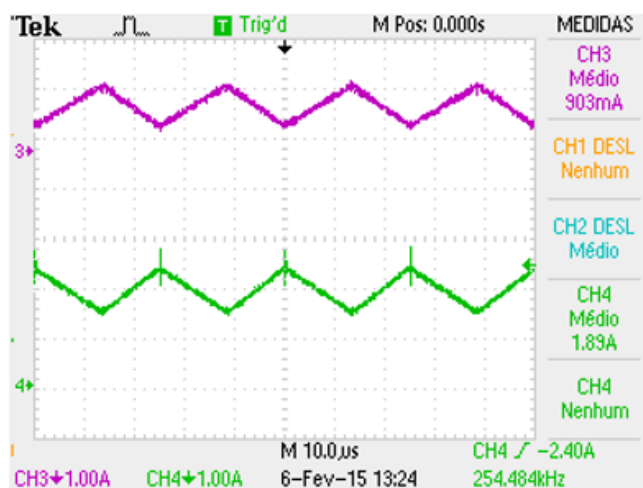


Figura 56 -  $V_1$  e  $I_1$  (a),  $V_2$  e  $I_2$  (b), e  $V_o$  e  $I_o$  (c)  
Fonte: Autoria própria.

No último modo de operação foi possível constatar que a alimentação da carga realizada através do módulo e da bateria se deu de maneira adequada, conforme o previsto neste modo. Observa-se em “b” que, diferentemente do modo de operação 4, a corrente na bateria possui valor positivo, o que significa que a mesma está fornecendo energia à carga.

Outro ponto importante a ser observado são os valores de corrente constantes devido à esta topologia possuir todas as entradas e saídas em corrente. Isso garante uma maior estabilidade da corrente, útil para muitas aplicações.

Analisando-se novamente a corrente nos indutores de entrada do módulo fotovoltaico e da bateria observa-se a variação de corrente na Figura 57, em comparação com a Figura 55, devido à mudança do modo de funcionamento.

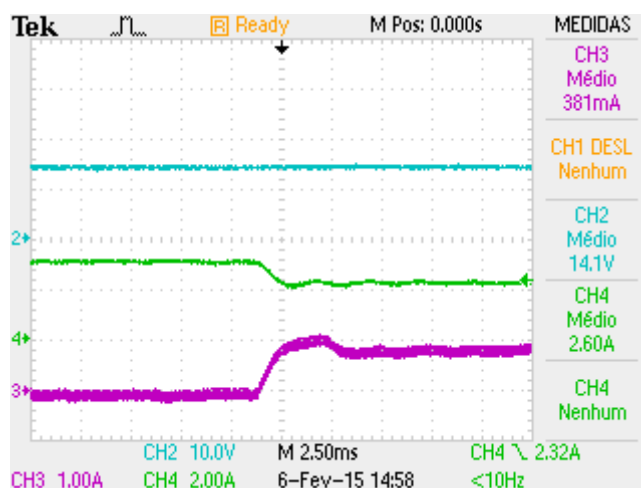


**Figura 57 -  $I_{L1}$ , e  $I_{L2}$**   
**Fonte: Autoria própria.**

Onde a forma de onda de corrente no indutor  $L_1$  é a verde, e a no indutor  $L_2$  é a rosa.

Por fim, a última análise realizada sobre o conversor foi com o objetivo de verificar o comportamento do mesmo na transição de um modo de operação para outro. Para isso aplicou-se um degrau na referência da corrente utilizada no controle do conversor, mostrado na Figura 58.





**Figura 58 - Transição de modo de operação**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nesta figura observa-se que inicialmente o conversor se encontrava no modo de operação 4. Aplicando-se o degrau verifica-se o controle atuando de forma que o conversor passe a operar no modo 5. É interessante notar que a variação do modo de operação não afetou a variação da tensão de saída, mantendo a mesma constante.

A partir dos ensaios realizados no conversor, foi medido o rendimento do mesmo, segundo seus modos de operação em potência nominal (Tabela 2).

Modo de operação	Rendimento (%)
Modo 1	77,95
Modo 2	78,85
Modo 3	86,58
Modo 4	79,02
Modo 5	81,79

**Tabela 2 - Rendimento do conversor**

Constatou-se que o rendimento do conversor ficou abaixo do esperado, pois esperava-se um rendimento acima de 90% para a topologia utilizada.

## 6.1 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentadas tanto formas de onda e valores obtidos na implementação do protótipo do conversor, como análises realizadas a partir dos resultados adquiridos. A partir dos testes realizados verificou-se o funcionamento do

conversor, e observou-se uma diferença na tensão de saída, que não atingiu o valor desejado de 19 V. Contudo, com relação à corrente, foi possível de se chegar a valores próximos ao exigido pela carga, no caso, 2,5 A.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de conclusão de curso apresentou o desenvolvimento de uma topologia inovadora para um conversor *three-port*, o qual tem por finalidade prover uma integração entre módulo fotovoltaico, bateria e carga.

O desenvolvimento foi iniciado por um estudo teórico dos componentes do sistema, bem como das topologias utilizadas como base para o conversor. Em seguida foi definida a topologia a ser utilizada e seus modos de funcionamento. A partir de simulações realizadas, foram observados esforços distintos nos capacitores conforme são alterados os fluxos de energia do conversor, o que resultou em uma alteração da topologia.

Posteriormente, utilizando a nova topologia, foi detalhada a montagem do protótipo, obtidos os resultados e realizadas as análises a partir das formas de onda geradas.

Pelos ensaios realizados, verificou-se o funcionamento do conversor em todos os modos de operação, o qual se mostrou satisfatório, atingindo o proposto para o conversor. Destaca-se a vantagem das entradas e saídas em corrente, que mantém valores de corrente constantes.

Um ponto importante observado foi com relação ao funcionamento do conversor na transição dos modos de operação, que se mostrou não ser um problema por manter a saída estável. No entanto, foi possível observar que a tensão de saída ficou em um nível abaixo do esperado. Isso foi causado possivelmente pelas perdas nos diodos não consideradas para o dimensionamento do transformador, no capacitor de saída, pela sua resistência interna, e também pela indutância de dispersão.

Uma possível solução para se elevar a tensão de saída seria realizar um novo dimensionamento do transformador, a fim de ajustar sua relação de transformação para fornecer a tensão necessária.

Uma das dificuldades encontradas neste projeto foi a verificação da comutação suave no conversor. Esta se dá pela medição de corrente em uma das chaves, sendo necessário um espaço maior no emissor do MOSFET para posicionar a ponteira de corrente. Para isso foi colocado um condutor, de modo que houvesse espaço para a medição. No entanto, essa ação provocou uma interferência alta e criou uma indutância, impossibilitando o funcionamento do conversor e a consequente medição.

Sugere-se para trabalhos futuros um estudo mais aprofundado do controle do conversor a fim de se obter a máxima potência a partir do módulo fotovoltaico, e permitir a construção de um produto a partir do mesmo. Também sugere-se implementar a primeira topologia proposta, com o intuito de averiguar seu potencial.

## REFERÊNCIAS

BAE, S.; KWASINSKI, A. **Maximum power point tracker for a multiple-input Cuk dc-dc converter**. Telecommunications Energy Conference. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5351942>> Acesso em: 05 jul. 2014.

BARBI, I.; SOUZA, F. P. de. **Conversores CC-CC Isolados De Alta Frequência Com Comutação Suave**. Florianópolis: Autores Associados, 1999.

CARANNANTE, G.; FRADDANNO, C.; PAGANO, M.; PIEGARI, L. **Experimental Performance of MPPT Algorithm for Photovoltaic Sources Subject to Inhomogeneous Insolation**. IEEE. Vol. 56. Páginas 4374 – 4380. Ed. 11. 2009.

CARDOSO, R.L. **Conversores CC-CAs Bidirecionais Isolados em Alta Frequência**. 2007. Dissertação (doutorado). Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90092/241259.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 21 jul. 2014.

COELHO, R.F. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. 2008. Dissertação (mestrado). Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/75141>> Acesso em: 26 jan. 2014.

**Energia Solar**. Disponível em: <[http://www.yinglisolar.com/br/solar-basics/#panel\\_section](http://www.yinglisolar.com/br/solar-basics/#panel_section)> Acesso em: 04 mai. 2014.

FACCIN, F. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**. 2004. Dissertação (mestrado). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/12544>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

HU, W.; WU, H.; Xing, Y.; SUN, K. **A Full-Bridge Three-Port Converter for Renewable Energy Application**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6803289>> Acesso em: 05 ago.2014.

HU, Y.; XIAO, W.; CAO, W.; JI, B.; MORROW, D.J. **Three-Port DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems**. Power Electronics, IEEE Transactions on.

2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6838982>> Acesso em: 03 ago. 2014.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2007. Monografia (Mestrado). Disponível em: <[http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?Codarquivo=1203](http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?Codarquivo=1203)> Acesso em: 19 nov. 2013.

MAITY, J.; MITRA, S.K.; MAJEE, J.; CHOWDHURI, S.; BERA, J. **Development of an efficient photovoltaic MPPT controller**. Power and Energy in NERIST (ICPEN). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=photovoltaic+mppt>> Acesso em: 25 ago. 2014

NASCIMENTO, C.A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. Monografia (Pós-Graduação). Disponível em: <[http://www.solenerg.com.br/files/monografia\\_cassio.pdf](http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf)>. Acesso em: 08 dez. 2013.

PARADISO, J.A.; STARNER, T. **Energy scavenging for mobile and wireless electronics**. Pervasive Computing. IEEE. Vol. 4. Páginas 18- 27. Ed. 1. 2005.

PEREIRA, E. B. A. **Estrutura fotovoltaica de apoio a trabalhos de campo**. 2013. Monografia (graduação). Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006451.pdf>> Acesso em: 19 nov. 2013.

**International Rectifier HEXFET® Power MOSFET**. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/191090/IRF/IRFZ48N.html>>. Acesso em: 31 jan. 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014. CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)> Acesso em: 26 jan. 2015.

SUM, J.; XU, M.; YING, Y.; LEE; F.C. **High Power Density, High Efficiency System Two-stage Power Architecture for Laptop Computers**. Power Electronics Specialists Conference, 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1711768>> Acesso em: 9 jun. 2014.

**Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board User's guide.** Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gx1?keyMatch=tiva&tisearch=Search-EN-Everything#Technical Documents>> Acesso em: 31 de jan. 2015

VILLALVA, M. G.; GAZOLI J. R. **Energia Solar Fotovoltaica** - Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede. São Paulo: Érica, 2012.

WORLD energy resources. Disponível em: <[http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER\\_2013\\_8\\_Solar\\_revised.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf)>. Acesso em: 13 jan. 2014.

ZHOU, Z.; WU, H.; MA, X.; XING, Y. **A non-isolated three-port converter for stand-alone renewable power system.** IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6389360>> Acesso em: 25 jun. 2014

## APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DOS INDUTORES E DO TRANSFORMADOR

O cálculo dos indutores foi realizado considerando-se uma razão cíclica de 0,5. Para o indutor empregado na entrada do módulo fotovoltaico foi utilizada a seguinte equação:

$$L_1 = D \cdot \frac{V_1}{\Delta I_1 \cdot f_s}$$

$$L_1 = 0,188 \text{ mH}$$

Já para o indutor presente na bateria foi utilizada outra equação, como mostrado a seguir:

$$L_2 = (1 - D) \cdot \frac{V_2}{\Delta I_2 \cdot f_s}$$

$$L_2 = 0,188 \text{ mH}$$

Por fim, para o indutor de saída foi utilizada a seguinte fórmula:

$$L_o = D \cdot \frac{(V_1 \cdot n - V_{omín})}{2 \cdot \Delta I_o \cdot f_s}$$

$$L_o = 0,07 \text{ Mh}$$

Após a obtenção dos valores de indutância foi realizado o cálculo de montagem dos indutores. Como as equações são as mesmas para os três indutores, será demonstrado o cálculo para o indutor da entrada no módulo fotovoltaico e os resultados para todos os indutores.

Primeiramente foi feito o cálculo do núcleo:

$$A_e A_w = \frac{L_1 \cdot \left(I_1 + \frac{\Delta I_1}{2}\right)^2}{K_w \cdot \Delta B_i \cdot J_i}$$

$$A_e A_w = 0.711 \text{ cm}^4$$



A partir deste valor foi escolhido o núcleo E-42/21/15, cujos dados são mostrados na Tabela 3.

Núcleo	Área da seção transversal ( $A_e$ )	Área da janela do carretel ( $A_w$ )	Comprimento médio de uma espira ( $l_{emed}$ )	Permeabilidade magnética do ar ( $\mu_0$ )
E-42/21/15	181 mm <sup>2</sup>	157 mm <sup>2</sup>	87 mm	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m

**Tabela 3 - Dados do núcleo do indutor de entrada do módulo fotovoltaico**

Em seguida foi calculado o número de espiras:

$$NL_1 = \frac{L_1 \cdot \left(I_1 + \frac{\Delta I_1}{2}\right)^2}{\Delta B_i \cdot A_e}$$

$$NL_1 = 21$$

Com o número de espiras foi calculado o entreferro:

$$\delta = \frac{2 \cdot N_{L1}^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e}{L_1}$$

$$\delta = 1,07 \text{ mm}$$

Sendo o núcleo utilizado do formato tipo “E”, o entreferro tem que ser dividido em dois. Logo, tem-se:

$$l_g = \frac{\delta}{2}$$

$$l_g = 0,535 \text{ mm}$$

Em seguida calculou-se o diâmetro do condutor. Para isso deve ser levado em conta a frequência empregada ao conversor, pois a mesma provoca o efeito *Skin* nos condutores:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}}$$

$$\Delta = 0,38 \text{ mm}$$

Como o diâmetro é  $2\Delta$ , que é igual a 0,75 mm, o condutor escolhido foi o AWG21, cujas dimensões são:

$$A_{cu} = 0,313 \text{ mm}^2$$

$$A_{is} = 0,5004 \text{ mm}^2$$

Com as áreas do condutor, foi calculada corrente que passa pelo condutor, e, em seguida, o número de condutores necessários:

$$I_{cu} = J_i \cdot A_{cu}$$

$$I_{cu} = 1,189 \text{ A}$$

$$n_{L_1} = \frac{I_1}{I_{cu}}$$

$$n_{L_1} = 4,204$$

Logo, foram necessários 5 condutores.

Com o valor encontrado, foi calculada a possibilidade de execução:

$$A_{w\text{mín}} = \frac{NL_1 \cdot n_{L_1} \cdot A_{is}}{K_w}$$

$$A_{w\text{mín}} = 90,1 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{w\text{mín}}}{A_w} = 0,574$$

Por último, foi calculado o comprimento do cabo:

$$l_{caboL_1} = l_{emed} \cdot NL_1$$

$$l_{caboL_1} = 1,827 \text{ m}$$

A partir dos mesmos cálculos foram obtidos os valores para o indutor presente na bateria, os quais são apresentados a seguir.

Núcleo:

$$A_e A_w = 45,5 \text{ mm}^4$$

A partir deste valor foi escolhido o núcleo E-42/21/15, cujos dados são mostrados na Tabela 3.

Número de espiras:

$$NL_2 = 17$$

Entreferro:

$$\delta = 0,701 \text{ mm}$$

$$l_g = 0,351 \text{ mm}$$

Diâmetro do condutor:

$$2\Delta = 0,75 \text{ mm}$$

Foi escolhido o condutor AWG21, cujas especificações são:

$$A_{cu} = 0,326 \text{ mm}^2$$

$$A_{is} = 0,6004 \text{ mm}^2$$

Número de condutores:

$$n_{L_2} = 3,229$$

Com este número de condutores verificou-se que a janela do indutor ficaria muito grande. Logo, decidiu-se reduzir a densidade de corrente nos condutores, aumentando seu número de forma a ocupar adequadamente a janela do indutor. Foi então verificado experimentalmente que 6 condutores seria a quantidade ideal.

Possibilidade de execução:

$$\frac{A_{wmin}}{A_w} = 0,557$$

Comprimento do cabo:

$$l_{caboL_2} = 1,479 \text{ m}$$

Por fim, foram realizados os cálculos para o indutor de saída, cujos resultados se encontram a seguir.

Núcleo:

$$A_e A_w = 6,6 \text{ mm}^4$$

A partir deste valor foi escolhido o núcleo E-30/15/7, cujos dados são mostrados na Tabela 4.

Núcleo	Área da seção transversal ( $A_e$ )	Área da janela do carretel ( $A_w$ )	Comprimento médio de uma espira ( $l_{emed}$ )	Permeabilidade magnética do ar ( $\mu_0$ )
E-30/15/7	60 mm <sup>2</sup>	80 mm <sup>2</sup>	56 mm	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m

**Tabela 4 - Dados do núcleo do indutor de saída**

Número de espiras:

$$NL_2 = 12$$

Entreferro:

$$\delta = 0,31 \text{ mm}$$

$$l_g = 0,155 \text{ mm}$$

Diâmetro do condutor:

$$2\Delta = 0,75 \text{ mm}$$

Foi escolhido o condutor AWG21, cujas especificações são:

$$A_{cu} = 0,3105 \text{ mm}^2$$

$$A_{is} = 0,7004 \text{ mm}^2$$

Número de condutores:

$$n_{L_3} = 2,119$$

Logo, foram necessários 3 condutores.

Possibilidade de execução:

$$\frac{A_{wmín}}{A_w} = 0,45$$

Comprimento do cabo:

$$l_{caboL_3} = 0,672 \text{ m}$$

O dimensionamento do transformador foi realizado seguindo os passos apresentados a seguir.

Núcleo:

$$A_e A_w = \frac{\frac{P_o}{\eta}}{K_t \cdot K_u \cdot K_p \cdot J_o \cdot B_o \cdot 2 \cdot f_s}$$

$$A_e A_w = 13810 \text{ mm}^4$$

A partir deste valor foi escolhido o núcleo EE-42/21/15, cujos dados são mostrados na **Error! Reference source not found.**

Núcleo	Área da seção transversal ( $A_e$ )	Área da janela do carretel ( $A_w$ )	Comprimento médio da espira ( $l_t$ )	Volume efetivo ( $V_e$ )
EE-42/21/15	181 mm <sup>2</sup>	157 mm <sup>2</sup>	87 mm	17600 mm <sup>3</sup>

**Tabela 5 - Dados do núcleo do transformador**

A relação de transformação é de 1,44, que é utilizada no cálculo do número de espiras do enrolamento primário e do secundário, o qual é mostrado a seguir.

$$N_p = \frac{V_{in}}{K_v \cdot A_e \cdot B_o \cdot f_s}$$

$$N_p = 5$$

$$N_s = n \cdot N_p$$

$$N_s = 7,2$$

O transformador foi construído utilizando-se de fio Litz, que é equivalente ao fio AWG 17 com seção transversal de:

$$A_{17} = 1 \text{ mm}^2$$

Assim obteve-se uma corrente eficaz na indutância de dispersão do transformador de:

$$I_{LdRMS} = 3,6 \text{ A}$$

Com a corrente calculou-se o número de condutores em paralelo no enrolamento primário ( $P_p$ ) e no secundário ( $P_s$ ).

$$P_p = \frac{I_{LdRMS}}{J_o \cdot S_{17}}$$

$$P_p = 2$$

$$P_s = \frac{I L_{dRMS}}{J_0 \cdot S_{17}} \cdot \frac{1}{n}$$

$$P_s = 1$$

As áreas de ocupação dos enrolamentos primário ( $A_p$ ) e secundário ( $A_s$ ) são:

$$A_p = 1,1 \cdot N_p \cdot S_{17} \cdot P_p$$

$$A_p = 11 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 1,1 \cdot N_s \cdot S_{17} \cdot P_s \cdot 2$$

$$A_s = 15,8 \text{ mm}^2$$

Sendo  $K_u$  a taxa de ocupação máxima do transformador limitada em 0,4, verificou-se a possibilidade de execução por:

$$K_u = \frac{A_p + A_s}{A_w}$$

$$K_u = 0,171$$

Por fim, foi calculado o comprimento do cabo para o primário e para o secundário, pelas seguintes equações:

$$l_{caboP} = I_t \cdot N_p$$

$$l_{caboP} = 0,435 \text{ m}$$

$$l_{caboS} = I_t \cdot N_s$$

$$l_{caboS} = 0,626 \text{ m}$$

## APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS

Componente	Identificação	Especificação	Quantidade
Diodo ultra rápido	UF5408	$V_{RRM} = 1000\text{ V}$ $V_{DC} = 1000\text{ V}$ $I_{(AV)} = 3\text{ A}$	2
Diodo Schottky	MBR1545CT	$V_{RRM} = 45\text{ V}$ $V_{DC} = 45\text{ V}$ $I_{(AV)} = 15\text{ A}$	1
Capacitor eletrolítico	-	1000 $\mu\text{F}/50\text{ V}$	3
Capacitor eletrolítico	-	470 $\mu\text{f}/50\text{ V}$	2
MOSFET	IRFZ48N	$V_{DSm\acute{a}x} = 55\text{ V}$ $I_{Dm\acute{a}x} = 64\text{ A}$ $R_{DS(on)m\acute{a}x} = 16\text{ m}\Omega$	2
Fusível	-	F5/L250V	1
Indutor	-	E-42/21/15 AWG 21	1
Indutor	-	E-42/21/15 AWG 21	1
Indutor	-	E-30/15/7 AWG 21	1
Transformador	-	EE-42/21/15 AWG 17	1
Resistor shunt	-	R10 5% 5W	3
Resistor	-	100 $\text{k}\Omega$	4
Resistor	-	18 $\text{k}\Omega$	1
Resistor	-	15 $\text{k}\Omega$	5

Resistor	-	1,5 k $\Omega$	3
Capacitor cerâmico	103	10 nF	4
Processador	Tiva™ TM4C123G	80 MHz / 32 bit / ARM® Cortex™- M4 / AD 12 bit	1
AmpOp	LM324	Alimentação: $\pm$ 1,5 V a $\pm$ 15 V	1
Driver	DRVHCPL(2R1)	Alimentação 12V	1



## APÊNDICE C – Firmware

```

ADC.c
1 //Funções de Inicialização
2 //configura o ADC do TM4C123
3 #include <stdbool.h>
4 #include <stdint.h>
5 #include "utils/uartstdio.h"
6 #include "priorities.h"
7 #include "FreeRTOS.h"
8 #include "task.h"
9 #include "queue.h"
10 #include "semphr.h"
11 #include "inc/hw_memmap.h"
12 #include "inc/hw_types.h"
13 #include "inc/hw_ints.h"
14 #include "inc/hw_timer.h"
15 #include "driverlib/rom.h"
16 #include "driverlib/sysctl.h"
17 #include "driverlib/timer.h"
18 #include "driverlib/adc.h"
19 #include "driverlib/pin_map.h"
20 #include "driverlib/gpio.h"
21 #include "driverlib/pwm.h"
22
23
24 #define SAMPLE_QUEUE_SIZE (5)
25 #define SAMPLE_ITEM_SIZE (sizeof(int32_t))
26
27 extern uint32_t gPWMPfrequency;
28 extern int32_t g_Setpoint;
29 extern float Vref;
30
31 xQueueHandle g_pSampleQueue=NULL;
32 int32_t Setpoint;
33 uint32_t ui32Value[8];
34 float Vfotovoltaiico,Vbateria,Vcarga,Vcarga2,Vcarga3,Vcarga4,Vcarga_avg;
35 float
Ifotovoltaiico,Ifotovoltaiico1,Ifotovoltaiico2,Ifotovoltaiico3,Ifotovoltaiico4,Ifotovol
taico_avg;
36 float Ibateria,Icarga;
37 float erro,Kp,Ki,aux,aux2;
38 int32_t P,I,I_ant;
39 void ADCConversionDone() {
40
41 uint32_t i;
42 uint32_t samples;
43
44 uint32_t cycle;
45 uint32_t val;
46 uint32_t maxpwm = configCPU_CLOCK_HZ / gPWMPfrequency;
47 int32_t PID;
48
49 portBASE_TYPE xHigherPriorityTaskWoken;
50 ADCIntClear(ADC0_BASE, 0);
51 GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_3, 0xFF);
52 /* We have not woken a task at the start of the ISR. */
53 xHigherPriorityTaskWoken = pdFALSE;

```

```

54
55 samples = ADCSequenceDataGet(ADC0_BASE, 0, ui32Value);
56
57 // Parametrização do AD
58
59 // Vfotovoltaico = (ui32Value[0]*(3.3/4095))*(18+110)/18;
60 // Vbateria = (ui32Value[1]*(3.3/4095)*(15+100))/15;
61 Vcarga = (ui32Value[2]*(3.3/4095))*(15+100)/15;
62
63 Ifotovoltaico = (ui32Value[3]*(3.3/4095))/5)/0.1;
64 // Ibateria = ((ui32Value[4]*(3.3/4095))/4.8)/0.1;
65 // Icarga = ((ui32Value[5]*(3.3/4095))/9)/0.1;
66
67
//=====
==
68 //Média de Valores
69
//=====
==
70
71 Vcarga_avg=(Vcarga+Vcarga2+Vcarga3+Vcarga4)/4;
72 Vcarga4=Vcarga3;
73 Vcarga3=Vcarga2;
74 Vcarga2=Vcarga;
75
76
Ifotovoltaico_avg=(Ifotovoltaico1+Ifotovoltaico2+Ifotovoltaico3+Ifotovoltaico4)/4;
77 Ifotovoltaico4=Ifotovoltaico3;
78 Ifotovoltaico3=Ifotovoltaico2;
79 Ifotovoltaico2=Ifotovoltaico;
80
81
82
//=====
==
83 //controladores
84
//=====
==
85 //
86
87
88
89
90
91 //Controle PID corrente de entrada
92 //-----
93 // if(aux=100){
94 // aux=0;
95 erro=Vref-Ifotovoltaico_avg;//Vcarga_avg;
96 // //Proporcional
97 Kp= 1500;
98 P=Kp*erro;
99 // if(P<=0){
100 // P=0;
101 // }
102 if(P>10000){
103 P= 10000;

```

```

104 }
105 //Integral
106 Ki=300 ;
107 I=erro*Ki+I_ant;
108 if(I<0){
109 I=0;
110 }
111 if(I>100000 ){
112 I= 100000;
113 }
114 I_ant=I;
115 //
116 // Parte do controle que se demonstrou desnecessaria para o controle do
conversor
117 // //Derivativo
118 // Kd= ;
119 // D_erro=erro-erro_ant
120 // D=Kd*D_erro;
121 // if(D<0){
122 // D=0;
123 // }
124 // if(D> ){
125 // D= ;
126 // }
127 //
128 // erro_ant=erro;
129 //
130
131 PID=P+I;//+D;
132 //Agora o valor encontrado deverá ser normalizado para a faixa do PWM
133 if(PID <= 35000)
134 {
135 //no nosso controle foi delimitado a razão ciclica a fim de que a mesma
não sai-se muito do ponto de operação (0.5)
136 cycle = maxpwm*0.35;
137 }
138 else
139 {
140 //assumindo que o limite máximo de ControlEffort é 100000
141 val = (PID*maxpwm)/(100000);// para o valor de chaveamento de 40KHz
142 if(val>=(maxpwm*0.55))
143 {
144 cycle = maxpwm*0.55;
145 }
146 else
147 {
148
149 cycle = val;
150 }
151 }
152
153
154 PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, cycle);
155 PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1,cycle);
156
157 //
158 //
159 // }
160 // else{

```

```

161 // aux++;
162 // }
163 // PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, (P+I));
164 // PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, (P+I));
165
166 //applyUK((P+I));
167 // applyUK(g_Setpoint);
168 //envia a amostra para a task do controlador
169 xQueueSendToBackFromISR(g_pSampleQueue, (void*)ui32Value,
170 &xHigherPriorityTaskWoken);
171
172 //if (xHigherPriorityTaskWoken) {
173 /* Actual macro used here is port specific. */
174 //vPortYieldFromISR();
175 //}
176 GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_3, 0x00);
177 portEND_SWITCHING_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
178 }
179
180
181
182 uint32_t ADCInit(uint32_t SamplePeriod_uS)
183 {
184 g_pSampleQueue = xQueueCreate(SAMPLE_QUEUE_SIZE, SAMPLE_ITEM_SIZE);
185 //
186 // Habilita o TIMER2
187 //
188 ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_TIMER2);
189
190 //
191 // Habilita o ADC0
192 //
193 ROM_SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_ADC0);
194
195 //configura o TIMER2 para servir de Trigger para o AD0
196 TimerConfigure(TIMER2_BASE, (TIMER_CFG_A_PERIODIC));
197 //
198 // Set the count time for the the periodic trigger timer (TimerA).
199 //
200 float Timer2Frequency = 1000000.0 / SamplePeriod_uS;
201 TimerLoadSet(TIMER2_BASE, TIMER_A,
202 (int32_t) (configCPU_CLOCK_HZ / Timer2Frequency));
203 //
204 // Configura o timer para triggarr o ADC
205 //
206 TimerControlTrigger(TIMER2_BASE, TIMER_A, true);
207
208 //
209 // Enable the first sample sequencer to capture the value of channel 0 when
210 // the TIMER2 trigger occurs
211 //
212 // ADCSequenceConfigure(ADC0_BASE, 0, ADC_TRIGGER_TIMER, 0);
213 ADCSequenceConfigure(ADC0_BASE, 0, ADC_TRIGGER_PWM0, 0);
214 ADCPhaseDelaySet(ADC0_BASE, ADC_PHASE_22_5);
215
216 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 0, ADC_CTL_CH0 );
217 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 1, ADC_CTL_CH1 );
218 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 2, ADC_CTL_CH2 );
219 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 3, ADC_CTL_CH4 );

```

```
220 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 4, ADC_CTL_CH5 );
221 ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 0, 5, ADC_CTL_IE | ADC_CTL_CH6 |
ADC_CTL_END);
222
223 //configura a interrupção do ADC
224 ADCIntDisable(ADC0_BASE, 0);
225 ADCIntClear(ADC0_BASE, 0);
226 ADCIntRegister(ADC0_BASE, 0, &ADCConversionDone);
227 //Todas as interrupções que utilizam SysCalls devem ter prioridades inferiores
à
constante
228 ROM_IntPrioritySet (INT_ADC0SS0, configMAX_SYSCALL_INTERRUPT_PRIORITY);
229
230 ADCIntEnable(ADC0_BASE, 0);
231 ADCSequenceEnable(ADC0_BASE, 0);
232
233 //
234 // Habilita o timer de trigger - Inicia o processo de amostragem
235 //
236 // TimerEnable(TIMER2_BASE, TIMER_A);
237
238 return(0);
239 }
240
```