UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANDRÉ LUIZ SILVA CRIVELLARI

CONTROLADOR DE CARGA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *OFF-GRID* COM TOPOLOGIA DE TRÊS PORTAS

VITÓRIA
2019

ANDRÉ LUIZ SILVA CRIVELLARI

CONTROLADOR DE CARGA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *OFF-GRID* COM TOPOLOGIA DE TRÊS PORTAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Luiz Silva Crivellari**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

VITÓRIA

2019

ANDRÉ LUIZ SILVA CRIVELLARI

CONTROLADOR DE CARGA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *OFF GRID* COM TOPOLOGIA DE TRÊS PORTAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Luiz Silva Crivellari**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 18, de Dezembro de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. MSc. Vinícius Secchin de Melo
Instituto Federal do Espírito Santo

RESUMO

Este projeto de graduação apresentou um controlador de carga para sistemas fotovoltaicos *off-grid*. Sistemas *off-grid* que precisem gerenciar o ponto de operação do painel fotovoltaico, determinar a tensão de saída e determinar quando a bateria estará sendo carregada e descarregada precisariam usar três conversores em um sistema descentralizado. O objetivo foi desenvolver um controlador que torne possível integrar vários conversores em uma só topologia, controlando o fluxo de potência entre painel fotovoltaico, bateria e carga em somente uma topologia concentrada. Para isso, foi usado uma topologia modificada de conversores cc-cc de três portas desenvolvido a partir do conversor *buck-boost,* com a adição de uma ponte H que comporte tanto a bateria quanto a carga. Tal topologia realizou todos os cinco modos possível de interação entre a bateria, carga e painel fotovoltaico, possibilitando uma porta bidirecional para a bateria, unidirecional de saída para a carga e unidirecional de entrada para o painel fotovoltaico.

Palavras-chave: Conversores três portas. Sistema fotovoltaico. *Off-grid*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema fotovoltaico *off-grid* 18

Figura 2 – Sistema fotovoltaico *off-grid* com conversores cc-cc 19

Figura 3 – Sistema fotovoltaico *off-grid* com conversor multiporta 19

Figura 4 – Fluxo de potência da placa para carga e bateria 20

Figura 5 – Fluxo de potência da placa para a carga 20

Figura 6 – Fluxo de potência da placa e bateria para a carga. 21

Figura 7 – Fluxo de potência da bateria para a carga. 21

Figura 8 – Fluxo de potência do painel para a bateria. 21

Figura 9 – Estruturas de conversores três portas. 22

Figura 10 – Topologia proposta por Vázquez N., Sanchez, Hernandez, Vázquez E., Garcia e Arau (2014) 24

Figura 11 – Topologia proposta por Zhoul, Wul, Ma e Xingl (2012) 24

Figura 12 – Topologia proposta por Zhang, Chen e Kang (2017). 25

Figura 13 – Topologia do exemplo do artigo 26

Figura 14 – Topologias buck-boost com ponte H proposto por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) 27

Figura 15 – Etapas de operação do modo em que o painel fotovoltaico fornece energia a carga e para a bateria 28

Figura 16 – Etapas de operação em que o fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga 28

Figura 17 – Etapas de operação no modo em que o fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga 29

Figura 18 – Etapas de operação no modo em que o fluxo de potência da bateria para a carga 29

Figura 19 – Topologias buck-boost com a célula ponte H com bateria proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) com uma adição de uma chave S_3 e um diodo D_3 30

Figura 20. – Situação quando a tensão da bateria é maior do que a tensão nos terminais do painel fotovoltaico 30

Figura 21 – Topologias buck-boost com a célula ponte H com bateria proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) com uma adição do diodo D_0, em vermelho, em série com a chave S_0.....31

Figura 22 – Conversor Proposto.....31

Figura 23 – Etapa 1 da topologia proposta do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente 32

Figura 24 – Etapa 2 da topologia proposta do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente 34

Figura 25 – Etapa 3 do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente.....36

Figura 26 – Forma de onda do acionamento das chaves.....37

Figura 27 – Forma de onda da corrente na bateria 38

Figura 28 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 1 38

Figura 29 –, Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 1.....39

Figura 30 – Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 1.....39

Figura 31 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 1.....40

Figura 32 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 1.....40

Figura 33 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 1.....41

Figura 34 – Etapa 3 da topologia proposta. Em vermelho, o fluxo de corrente 49

Figura 35 – Forma de onda do acionamento das chaves no modo 2.....51

Figura 36 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 2 51

Figura 37 –Forma de onda da corrente na bateria no modo 2 52

Figura 38 –Forma de onda do capacitor de entrada no modo 2.....52

Figura 39 – Forma de onda do capacitor de entrada no modo 2.....53

Figura 40 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 2 53
Figura 41 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 2 54
Figura 42 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 2 54
Figura 43 – Etapa 2 da topologia proposta. Em vermelho, o fluxo de corrente 61
Figura 44 – Forma de onda do acionamento das chaves 63
Figura 45 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 3 63
Figura 46 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 3 64
Figura 47 – Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 3 64
Figura 48 – Forma de onda da corrente no capacitor de saída no modo 3 65
Figura 49 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 3. 65
Figura 50 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 3 66
Figura 51 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 3 66
Figura 52 – Forma de onda do acionamento das chaves 74
Figura 53 – Forma da onda da corrente no indutor no modo 4 75
Figura 54 – Forma de onda da corrente do capacitor de entrada no modo 4 75
Figura 55 – Forma de onda da corrente do capacitor de saída no modo 4 76
Figura 56 – Forma de onda da tensão no indutor no modo 4. 76
Figura 57 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 4 77
Figura 58 – Forma de onda da tensão no capacitor de entrada no modo 4 77
Figura 59 – Forma de onda do acionamento das chaves 83
Figura 60 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 5 84
Figura 61 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 5 84
Figura 62 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 5 85
Figura 63 – Forma de onda da tensão no capacitor de entrada no modo 5 85
Figura 64 – Forma de onda do acionamento das chaves 91
Figura 65 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 6 91

Figura 66 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 6 92

Figura 67 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 6.....92

Figura 68 –. Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 6.....93

Figura 69 – Sinal de Saída de acionamento das chaves.....101

Figura 70 – Circuito Implementado.....106

Figura 71 – Acionamento das chaves.....107

Figura 72 – Ripple da tensão de saída.....108

Figura 73 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja.....108

Figura 74 – Ripple na corrente no indutor 109

Figura 75 – Forma de onda da tensão no indutor.....109

Figura 76 – Ripple da tensão de entrada.....110

Figura 77 – Valor da corrente de entrada 110

Figura 78 – Corrente de saída da bateria 111

Figura 79 – Acionamento das chaves.....111

Figura 80 – Ripple da tensão de saída.....112

Figura 81 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja.....112

Figura 82 – Forma de onda da tensão do indutor.....113

Figura 83 – Ripple na corrente no indutor 113

Figura 84 – Ripple da tensão de entrada.....114

Figura 85 – Corrente de entrada 114

Figura 86 – Corrente da bateria.....115

Figura 87 – Acionamento das chaves 115

Figura 88 – Ripple da tensão de saída.....116

Figura 89 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja 116

Figura 90 – Ripple na corrente no indutor. 117

Figura 91 – Tensão no Indutor 117

Figura 92 – Ripple da tensão de entrada.....118

Figura 93 – Curva da corrente de entrada.....118

Figura 94 – Corrente da bateria.....119

Figura 95 – Acionamento das chaves.....119

Figura 96 – Ripple da tensão de saída.....120

Figura 97 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja.....120

Figura 98 – Ripple na corrente no indutor 121

Figura 99 – Ripple da tensão de entrada.....122

Figura 100 – Curva da corrente de entrada.....122

Figura 101 – Acionamento das chaves 123

Figura 102 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja 123

Figura 103 – Ripple na corrente no indutor 124

Figura 104 – Ripple da tensão de entrada.....124

Figura 105 – Curva da corrente de entrada.....125

Figura 106 – Forma de onda da corrente na bateria 125

Figura 107 – Acionamento das chaves.....126

Figura 108 – Ripple da tensão de saída.....126

Figura 109 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja 127

Figura 110 – Ripple na corrente no indutor 127

Figura 111 – Corrente de saída da bateria.....128

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos do painel fotovoltaico modelado pelo PSIM 97

Quadro 2 – Especificações do Conversor 101

Quadro 3 – Valores de corrente no indutor no modo 1.....102

Quadro 4 – Valores de corrente dos capacitores no modo 1.....102

Quadro 5 – Valores de corrente na bateria no modo 1.....103

Quadro 6 – Valores das correntes das chaves no modo 1.....103

Quadro 7 – Valores das Correntes dos diodos no modo 1.....103

Quadro 8 – Valores de corrente no indutor no modo 2.....104

Quadro 9 – Valores de corrente dos capacitores no modo 2.....104

Quadro 10 – Valores de corrente na bateria no modo 2.....104

Quadro 11 – Valores das correntes das chaves no modo 2.....104

Quadro 12 – Valores das Correntes dos diodos no modo 2.....104

Quadro 13 – Valores de corrente no indutor no modo 3.....105

Quadro 14 – Valores de corrente dos capacitores no modo 3.....105

Quadro 15 – Valores de corrente na bateria no modo 3.....105

Quadro 16 – Valores das correntes das chaves no modo 3.....106

Quadro 17 – Valores das Correntes dos diodos no modo 3.....106

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{OUT}	Tensão de saída na carga (V)
S_0	Código usado para indicar chave de número zero do circuito proposto
S_1	Código usado para indicar chave de número um do circuito proposto
S_2	Código usado para indicar chave de número dois do circuito proposto
S_3	Código usado para indicar chave de número três do circuito proposto
D_0	Código usado para indicar o diodo de número zero do circuito proposto
D_1	Código usado para indicar o diodo de número um do circuito proposto
D_2	Código usado para indicar o diodo de número dois do circuito proposto
D_3	Código usado para indicar o diodo de número três do circuito proposto
D_4	Código usado para indicar o diodo de número quatro do circuito proposto
t	Tempo (s)
I_{Cin} (t)	Corrente instantânea no capacitor de entrada (A)
C_{Int}	Valor da capacitância de entrada do capacitor (F)
V_{cin} (t)	Tensão instantânea sobre o capacitor de entrada (V)
I_{pv}	Corrente de saída do painel fotovoltaico (A)
I_L (t)	Corrente instantânea do indutor (A)
I_{Cout} (t)	Corrente instantânea no capacitor de entrada (A)
C_{out}	Valor da capacitância de saída do capacitor (F)
V_{cout} (t)	Tensão instantânea sobre o capacitor de saída (V)
R_{load}	Valor da resistência do resistor (Ω)
V_{pv}	Tensão de saída do painel fotovoltaico (V)
d_0	Razão cíclica da chave S_0
d_2	Razão cíclica da chave S_2
T_s	Período de chaveamento (s)
V_{bat}	Tensão instantânea sobre a bateria (V)
ΔI_l	Variação da corrente no indutor (A)
ΔI_{lE1}	Variação da corrente no indutor na etapa 1(A)
ΔI_{lE2}	Variação da corrente no indutor na etapa 2 (A)
ΔI_{lE3}	Variação da corrente no indutor na etapa 3 (A)
I_{min}	Valor da corrente mínima no indutor (A)
I_{lmed}	Valor da corrente média no indutor (A)
I_{LRMS}	Valor da corrente eficaz no indutor (A)

I_{Cinmed}	Valor da corrente média no capacitor de entrada (A)
I_{CinRMS}	Valor da corrente eficaz no capacitor de entrada (A)
I_{Batmed}	Valor da corrente média na bateria (A)
I_{BatRMS}	Valor da corrente eficaz na bateria (A)
I_{S0med}	Valor da corrente média na chave S_0 (A)
I_{S0RMS}	Valor da corrente eficaz na chave S_0 (A)
I_{S2med}	Valor da corrente média na chave S_2 (A)
I_{S2RMS}	Valor da corrente eficaz na chave S_2 (A)
I_{D0med}	Valor da corrente média no diodo D_0 (A)
I_{D0RMS}	Valor da corrente eficaz no diodo D_0 (A)
I_{D1med}	Valor da corrente média no diodo D_1 (A)
I_{D1RMS}	Valor da corrente eficaz no diodo D_1 (A)
I_{D2med}	Valor da corrente média no diodo D_2 (A)
I_{D2RMS}	Valor da corrente eficaz no diodo D_2 (A)
f	Frequência de chaveamento (Hz)
ΔV_{Cout}	Variação da tensão no capacitor de saída (V)
ΔV_{Cin}	Variação da tensão no capacitor de entrada (V)
ΔIl	Variação da corrente no indutor (A)
ΔIl_{max}	Variação da corrente no indutor (A)
ΔV_{out}	Variação da tensão de saída (V)
ΔV_{out}	Variação da tensão de saída (V)
ΔV_{in}	Variação da tensão de entrada (V)
$I_{bat}(t)$	Corrente instantânea da bateria (A)
V_{cin} (t)	Tensão instantânea sobre o capacitor de entrada (V)
V_{cout} (t)	Tensão instantânea sobre o capacitor de saída (V)
V_L (t)	Tensão instantânea sobre o indutor (V)
I_{pv}	Corrente de saída do painel fotovoltaico (A)
V_{pv}	Tensão de saída do painel fotovoltaico (V)
L	Valor da indutância do indutor (H)
v_c (t)	Tensão instantânea sobre o capacitor (V)
C_{out}	Valor da capacitância de saída do capacitor (F)
C_{Int}	Valor da capacitância de entrada do capacitor (F)
d_0	Razão cíclica da chave S_0

d_1	Razão cíclica da chave S_1
d_2	Razão cíclica da chave S_2
d_3	Razão cíclica da chave S_3
ΔIl	Variação da corrente no indutor (A)
ΔV_{out}	Variação da tensão de saída (V)
ΔV_{in}	Variação da tensão de entrada (V)
f	Frequência de chaveamento (Hz)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18

1.1 Referencial bibliográfico 18

1.2 Objetivo e justificativa 26

2 DESENVOLVIMENTO 27

2.2 Modo 1 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria 31

2.2.1 Etapas de operação 31

2.2.2 Formas de onda 37

2.2.3 Ganho estático 41

2.2.4 Ondulação da corrente no indutor 42

2.2.5 Corrente no indutor 42

2.2.6 Corrente no capacitor de entrada 43

2.2.7 Corrente no capacitor de saída 44

2.2.8 Corrente na bateria 45

2.2.9 Correntes nas chaves 45

2.2.10 Correntes nos diodos 46

2.2.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída 48

2.2.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada 48

2.3 Modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria. 49

2.3.1 Etapas de operação 49

2.3.2 Formas de onda 51

2.3.3 Ganho estático 54

2.3.4 Ondulação da corrente no indutor 55

2.3.5 Corrente no indutor 56

2.3.6 Corrente no capacitor de entrada 57

2.3.7 Corrente no capacitor de saída 57

2.3.8 Corrente na bateria 58

2.3.9 Correntes nas chaves 58

2.3.10 Correntes nos diodos 60

2.3.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída 60

2.3.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada 60

2.4 Modo 3 – fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga 61

2.4.1 Etapas de operação 61

2.4.2 Formas de onda 63

2.4.3 Ganho estático 66

2.4.4 Ondulação da corrente no Indutor 67

2.4.5 Corrente no indutor 68

2.4.6 Corrente no capacitor de entrada 69

2.4.7 Corrente no capacitor de saída 70

2.4.8 Corrente na bateria 70

2.4.9 Correntes nas chaves 71

2.4.10 Correntes nos diodos 72

2.4.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída 73

2.4.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada 73

2.5 Modo 4 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga 74

2.5.1 Etapas de operação 74

2.5.2 Formas de onda 74

2.5.3 Ganho estático 77

2.5.4 Ondulação da corrente no indutor 78

2.5.5 Corrente no indutor 78

2.5.6 Corrente no capacitor de entrada 80
2.5.7 Corrente no capacitor de saída 80
2.5.8 Correntes nas chaves 81
2.5.9 Correntes nos diodos 82
2.5.10 Ondulação da tensão no capacitor de saída 82
2.5.11 Ondulação da tensão no capacitor de entrada 83
2.6 Modo 5 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a bateria 83
2.6.1 Etapas de operação 83
2.6.2 Formas de onda 83
2.6.3 Ganho estático 86
2.6.4 Ondulação da corrente no indutor 86
2.6.5 Corrente no indutor 87
2.6.6 Corrente no capacitor de entrada 88
2.6.7 Corrente na bateria 89
2.6.8 Correntes nas chaves 89
2.6.9 Correntes nos diodos 90
2.6.10 Ondulação da tensão no capacitor de entrada 90
2.7 Modo 6 – fluxo de potência da bateria para a carga.....91
2.7.1 Etapas de operação 91
2.7.2 Formas de onda 91
2.7.3 Ganho estático 93
2.7.4 Ondulação da corrente no indutor 94
2.7.5 Corrente no indutor 94
2.7.6 Corrente no capacitor de saída 95
2.7.7 Corrente na bateria 95
2.7.8 Correntes nas chaves 96

2.7.9 Correntes nos diodos 96

2.7.10 Ondulação da tensão no capacitor de saída 97

2.8 Simulações computacionais 97

2.8.1 Especificações 97

2.8.2 Capacitor de entrada 98

2.8.3 Indutor 99

2.8.4 Capacitor de saída 99

2.9 Operação do conversor 100

2.9.1 Acionamento das chaves 100

2.10 Especificações do conversor 101

2.10.1 Modo 1 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria 102

2.10.2 Modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria 103

2.10.3 Modo 3 - fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga 105

2.11 Simulação 106

2.11.1 Conversor no modo 1 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria 107

2.11.2 Conversor no modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria 111

2.11.3 Conversor no modo 3 - fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga 115

2.11.4 Conversor no modo 4 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga 119

2.11.5 Conversor no modo 5 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a bateria 122

2.11.6 Conversor no modo 6 - fluxo de potência da bateria para a carga 125

3 CONCLUSÃO 129

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 131

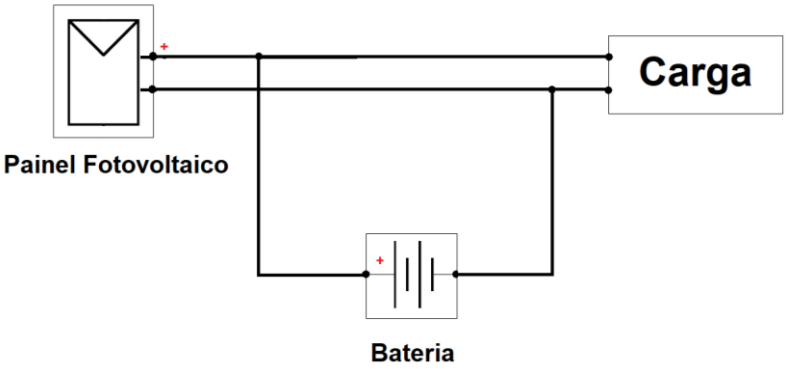
1 INTRODUÇÃO

1.1 Referencial bibliográfico

Um sistema *off-grid* fotovoltaico consiste em uma instalação desconectada da rede de energia elétrica. É composto por três componentes: o painel fotovoltaico, uma bateria e uma carga.

Partindo da ideia de ligar os componentes em paralelo, a Figura 1 ilustra esta ligação. Da forma que os elementos estão interligados, não é possível controlar nenhum ponto de operação dos elementos.

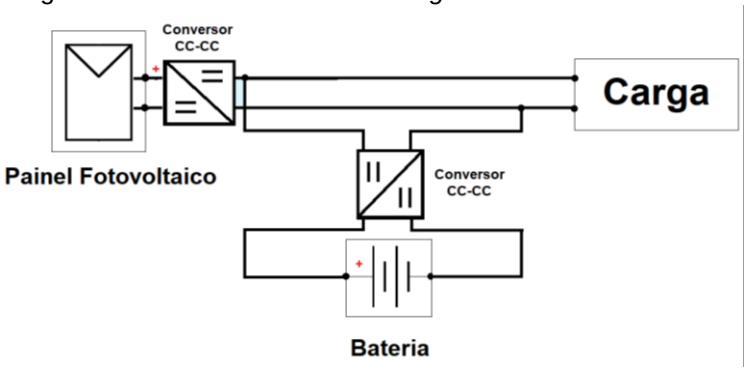
Figura 1 – Sistema fotovoltaico *off-grid*



Fonte: Produção do próprio autor.

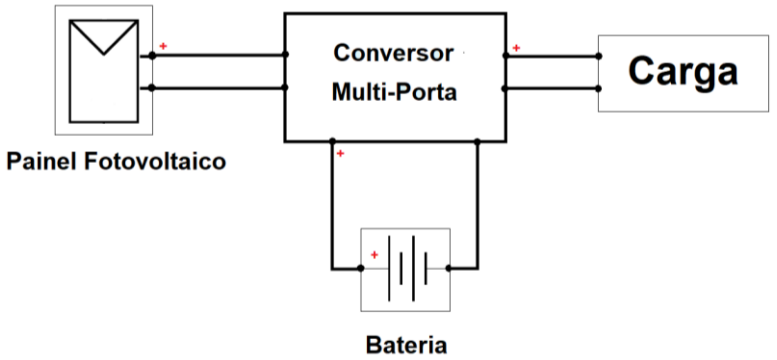
Para ser possível controlar o ponto de operação do painel fotovoltaico, determinar quando a bateria estará sendo carregada e descarregada e definir um valor de tensão para a saída da carga, é preciso inserir um conversor cc-cc em cada um dos elementos, como ilustrado na Figura 2. Entretanto, o sistema contém agora três conversores com um gerenciamento descentralizado. Para tornar todo o sistema com gerenciamento centralizado, é preciso uma nova abordagem. Para isso existem os conversores multiporta. Esta tecnologia de conversor comporta várias entradas e saídas, interconectando diferentes fontes de energia e acumuladores em um sistema completamente centralizado. A Figura 3 ilustra um sistema usando um conversor multiporta.

Figura 2 – Sistema fotovoltaico *off-grid* com conversores cc-cc



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico *off-grid* com conversor multiporta



Fonte: Produção do próprio autor.

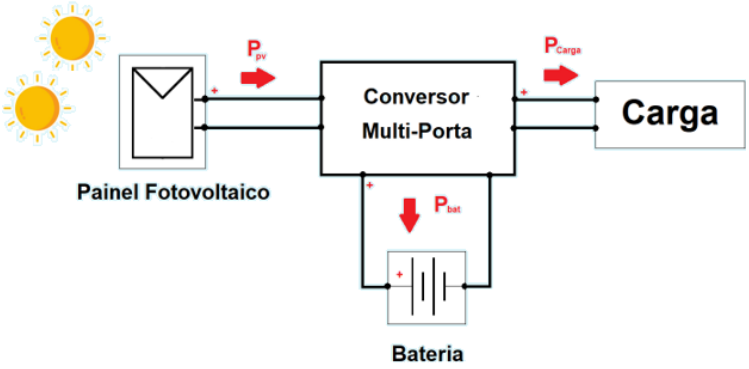
Os conversores multiporta apresentam grandes vantagens ao sistema tradicional de controladores de carga encontrados. Tao, Kotsopoulo, Duarte e Hendrix (2006) afirmam que estas estruturas têm a vantagem de conter menos componentes passivos e menos etapas de conversão. Com a diminuição da quantidade de componentes, há redução de peso e de custo, tornando mais compacto e barato. Além disso, diferentemente do arranjo de vários conversores cc-cc em cascata ou série, no conversor três portas todo o gerenciamento e controle é centralizado. De desvantagens, Tao, Kotsopoulo, Duarte e Hendrix (2006) afirmam que o sistema de controle é mais complexo, comparado ao tradicional.

Deste modo, para a aplicação no sistema fotovoltaico descrito, é preciso um conversor três portas contendo uma porta unidirecional de entrada para o painel, uma porta bidirecional para a bateria e uma unidirecional de saída para a carga.

Além disso, o conversor deve permitir todas as combinações possíveis de fluxo de energia entre as portas. Estas possibilidades estão ilustradas nas Figuras 4 a 8.

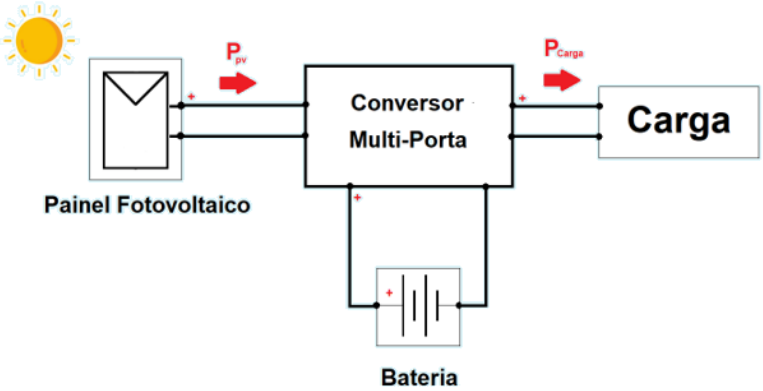
Na Figura 4, há a situação em que o painel fotovoltaico pode fornecer potência tanto para a bateria quanto para a carga. Entretanto, caso a potência da placa caia e só seja suficiente para alimentar a carga, o conversor deve tornar possível o fluxo de potência, como ilustrado na Figura 5.

Figura 4 – Fluxo de potência da placa para carga e bateria



Fonte: Produção do próprio autor.

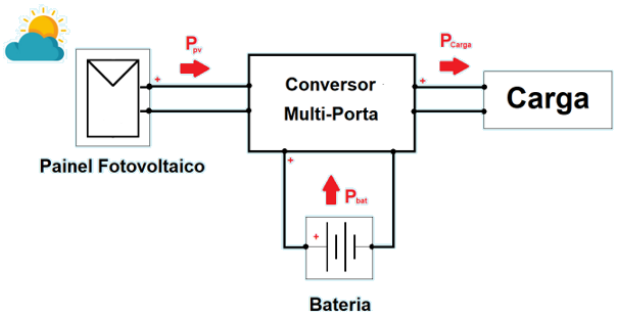
Figura 5 – Fluxo de potência da placa para a carga



Fonte: Produção do próprio autor.

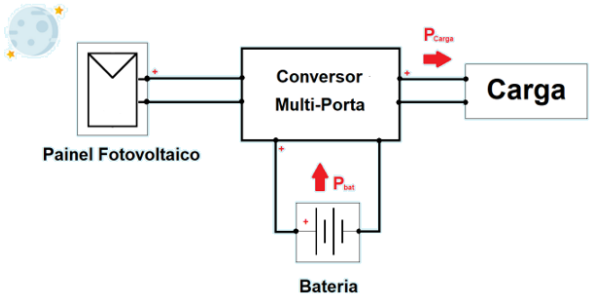
Já na Figura 6 ilustra a situação em que a bateria auxilia no fluxo de potência junto do painel e na Figura 7 somente a bateria fornece energia a carga, em situações em que o painel fotovoltaico não possa fornecer potência. A Figura 8 ilustra o caso em que não há carga conectada e a bateria está descarregada. Nesta situação, ela é carregada pelo painel fotovoltaico.

Figura 6 – Fluxo de potência da placa e bateria para a carga



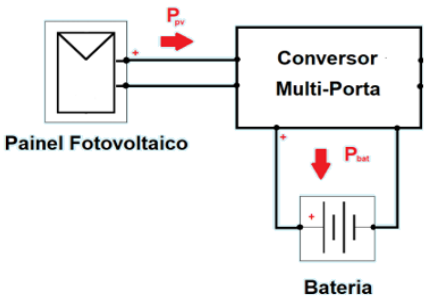
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 7 – Fluxo de potência da bateria para a carga



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 8 – Fluxo de potência do painel para a bateria

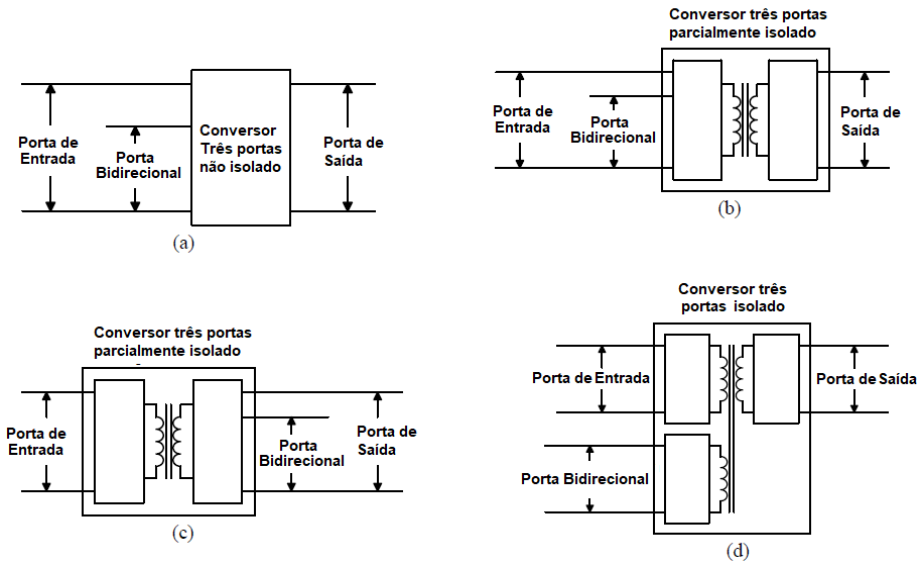


Fonte: Produção do próprio autor.

Conversores de três portas podem ser usados para integrar painel fotovoltaico, bateria e carga. Feitos a partir de modificações em topologias conhecidas, encontram-se vários exemplos para diferentes casos. Das topologias três portas existentes, estas podem ser classificadas em não-isoladas, isoladas e parcialmente isoladas. Todas as

classificações são capazes de implementar portas bidirecionais e incorporar diferentes fontes de energia. A Figura 9 ilustra as configurações de topologias existentes.

Figura 9 – Estruturas de conversores três portas



Fonte: Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016).
Nota: Traduzido pelo autor.

Topologias isoladas são aquelas em que todas as portas estão interconectadas por acoplamento magnético feito por um transformador. Assim, há a conexão magnética das portas, com o fluxo de energia sendo comandado pela diferença de fase entre a modulação PWM em cada porta. As topologias isoladas são derivadas das topologias de ponte completa.

Topologias não-isoladas são aquelas em que todas as portas estão conectadas diretamente, sem isolação galvânica. Sua grande vantagem é a redução de tamanho e maior densidade de potência. São derivadas das topologias mais comuns como *buck*, *boost* e *buck-boost*.

Além destas duas, há o modelo parcialmente isolado, em que há o uso de transformador para isolar a entrada da saída, enquanto duas das três portas são conectadas diretamente, como na topologia não-isolada. São derivadas da topologia meia ponte e contém uma porta bidirecional.

Comparando às duas estruturas, a topologia não isolada tem a vantagem de não usar um transformador de alta frequência, reduzindo o tamanho e aumentando a eficiência. Outro ponto positivo é o uso menos componentes ativos, como chaves e diodos. Já conversor isolado tem isolação galvânica e permite a conexão de fontes de energia e saída de diferentes níveis de tensão.

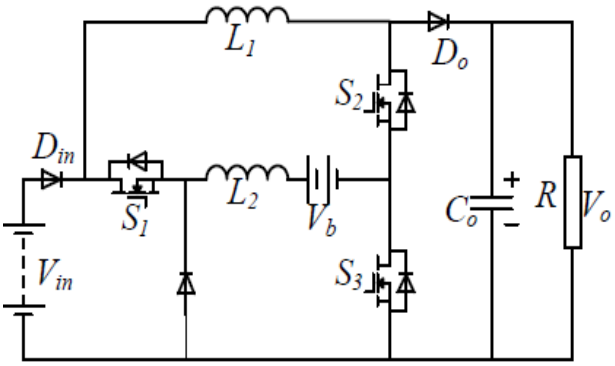
Como presente no artigo de Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016), conversores não-isolados tendem a ser mais baratos e por usar menos chaves há maior confiabilidade, sendo usado em pequenas potências caso não exista a necessidade de isolamento entre as portas. Considerando conversores não-isolados, há uma variedade de trabalhos das mais diferentes topologias registradas na literatura focadas na interligação entre bateria, painel fotovoltaico e carga.

No artigo de Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016) há uma análise de várias topologias três portas. Destacando somente as não-isoladas, há os seguintes exemplos.

O conversor proposto no artigo de Vázquez N., Sanchez, Hernandez, Vázquez E., Garcia e Arau (2014) é uma topologia três portas derivada do conversor *buck*, com a adição de mais elementos para proporcionar um caminho bidirecional para a bateria. A Figura 10 ilustra a topologia desenvolvida. Esta topologia pode realizar todas as combinações possíveis de fluxo de potência entre os elementos, como ilustrado nas Figuras 4 a 8.

Contém somente dois indutores, além de ser um abaixador-elevador para a porta de entrada com o painel fotovoltaico, permitindo um rastreamento de máxima potência que cubra toda a curva de tensão-corrente do painel fotovoltaico. Além disso, o sistema propõe um gerenciamento simples, com um perturba e observa para o painel fotovoltaico e um algoritmo simplificado para obter a mínima energia disponível vindo da bateria. Entretanto, a topologia não funciona como abaixador elevador para a bateria quando esta precisa fornecer energia para a carga, limitando a tensão de operação da saída além de haver uma restrição entre os valores de tensão da bateria e do painel fotovoltaico.

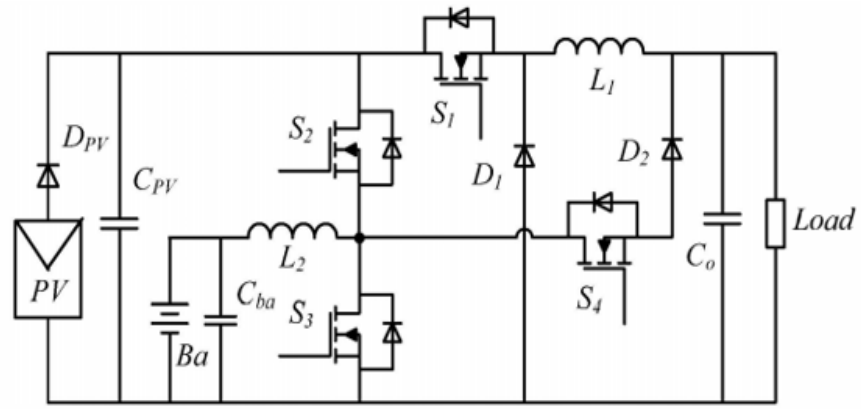
Figura 10 – Topologia proposta por Vázquez N., Sanchez, Hernandez, Vázquez E., Garcia e Arau (2014)



Fonte: Vázquez N., Sanchez, Hernandez, Vázquez E., Garcia e Arau (2014).

O trabalho apresentado por Zhoul, Wul, Ma e Xingl (2012) permite o rastreamento de máxima potência, controle de carregamento de bateria e manutenção da tensão da carga em um valor constante. A Figura 11 ilustra a topologia desenvolvida a partir de uma estrutura comum, o conversor *buck*. Outro ponto positivo é permitir funcionamento só para a tensão nos terminais do painel fotovoltaico maior do que a tensão da bateria além de ter um número pequeno de chaves e diodos, três e dois, respectivamente. Entretanto, somente atua como abaixador, limitando o valor da tensão de saída e só contempla estas possibilidades de operação: fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga, fluxo de potência do painel para a bateria e a carga e, por último, o fluxo de potência da bateria para a carga.

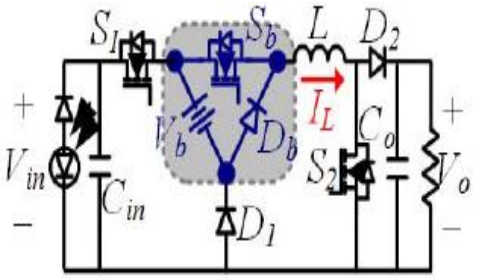
Figura 11 – Topologia proposta por Zhoul, Wul, Ma e Xingl (2012)



Fonte: Zhoul, Wul, Ma e Xingl (2012).

Zhang, Chen e Kang (2017) apresentam uma topologia utiliza a célula desenvolvida por Chen, Yu., Wen, Peng, Kang e Chen, Jiang (2013). Esta célula composta pela bateria, diodo e chave pode ser inserida nó comum de diodo, chave e indutor, criando conversores três portas a partir de estruturas conhecidas não-isoladas como *buck, boost, buck-boost, cúk, zeta e SEPIC*. Assim, Zhang, Chen e Kang consideram a topologia *buck-boost* sem inversão e como há dois pontos para a inserção da célula, o artigo apresenta quatro configurações, ilustradas na Figura 12, de conversor três portas a ser escolhido. O conversor proposto no artigo e demonstrado opera em todas as combinações possíveis de fluxo de potência entre painel, bateria e carga, pode implementar o rastreamento do ponto de máxima potência, cobrindo toda a curva corrente-tensão nos terminais do painel fotovoltaico além de ser abaixador-elevador para todas as entradas. Há uma restrição de operação, o valor da tensão de saída deve ser menor que a tensão da bateria e do painel fotovoltaico.

Figura 12 – Topologia proposta por Zhang, Chen e Kang (2017)

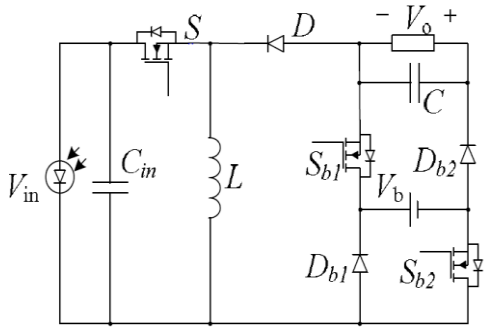


Fonte: Zhang, Chen e Kang (2017).

Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) propõem um sistema de célula para inserção em topologias comuns não-isoladas para que estas se tornem conversores multiporta. A célula proposta é uma ponte H com uma bateria no meio, podendo ser inserida antes da carga, ou antes da fonte de energia principal. Com esta é possível obter um conjunto de seis configurações diferentes de conversor três portas para cada topologia existente. Dentre as combinações possíveis, Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) analisam o modelo de *buck-boost* inserido uma das células propostas. É obtido um conversor três portas com somente uma restrição, a tensão de entrada precisa ser maior que a da bateria. A Figura 13 ilustra a topologia exemplificada no artigo. Neste caso, o valor da tensão de entrada pode ser qualquer um, pois Feng, Yang, Zerong e

Zhu (2018) afirmam que devido o painel e a bateria ficarem com as polaridades de tensão opostas, a bateria não impõe limitação ao valor da tensão de saída. Além disso, o conversor usa somente um indutor, três *mosfets* e três diodos e é possível operar como abaixador-elevador para todos os modos. A desvantagem registrada é que o conversor não contém um caminho separado para carregar a bateria, não sendo possível o painel fotovoltaico carregar a bateria separadamente, como ilustrado na Figura 8.

Figura 13 – Topologia do exemplo do artigo



Fonte: Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018).

1.2 Objetivo e justificativa

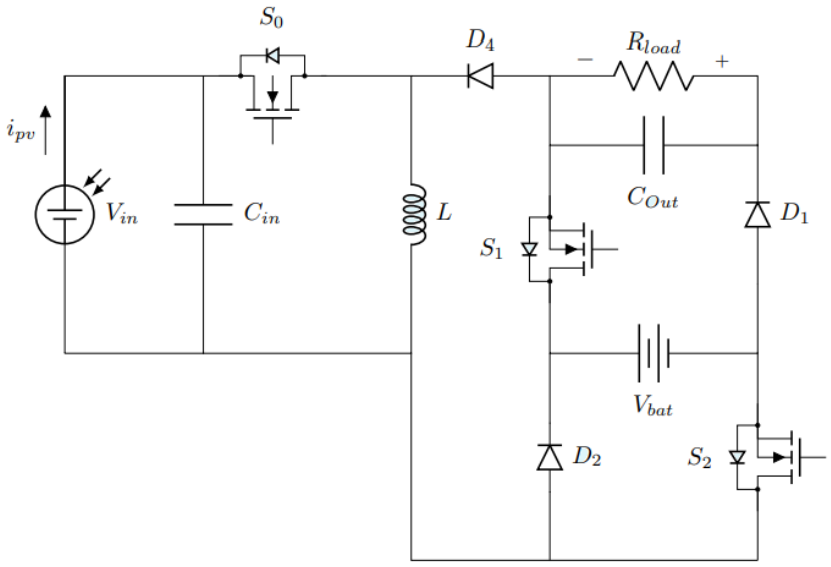
Com o uso de conversores três portas é possível desenvolver um conversor com gerenciamento centralizado que possibilite controlar os pontos de operação entre painel fotovoltaico, bateria e carga com as cinco possibilidades de fluxo de potência entre os elementos. A partir do que foi proposto, o objetivo foi o estudo e análise de um conversor três portas que interconecte painel fotovoltaico, bateria e carga a partir de uma topologia já existente que consiga realizar todas as formas de fluxo de potência ilustrados nas Figuras 4 a 8. O projeto foi feito considerando um painel fotovoltaico de 50 W em conjunto de uma bateria de 6 V. A carga será um resistor 10 Ohms.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Conversor três portas buck-boost com a célula ponte H

Das quatro topologias analisadas no referencial teórico, a mais promissora é a topologia proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018). No circuito *buck-boost* com a célula ponte H exemplificado no artigo, ilustrado na Figura 14 encontram-se as vantagens de ser abaixador-elevador para todas as portas e não ter limitação relacionando a tensão de saída.

Figura 14 – Topologias buck-boost com ponte H proposto por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018)

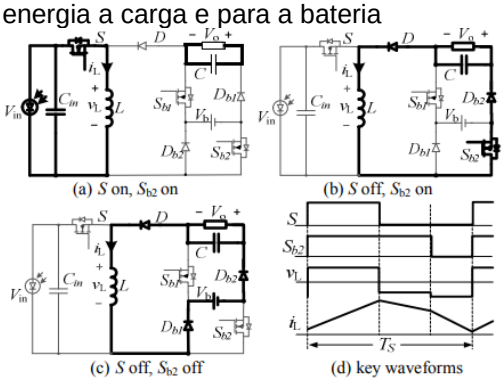


Fonte: Produção do próprio autor.

Esta topologia contém quatro modos de operação. O primeiro modo é o fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e para a bateria, como ilustrado na Figura 15. Na primeira etapa, o indutor é carregado pela tensão nos terminais do painel. Este indutor será descarregado nas outras etapas seguintes. Na segunda etapa somente ocorre o fornecimento de energia para a carga e na terceira etapa, o restante da energia no indutor alimenta a bateria e a carga. Neste modo, é possível tanto carregar a bateria quanto carregar a carga, entretanto, o carregamento da bateria é simultâneo

com a carga, não existindo um intervalo de tempo em que a bateria é carregada separadamente.

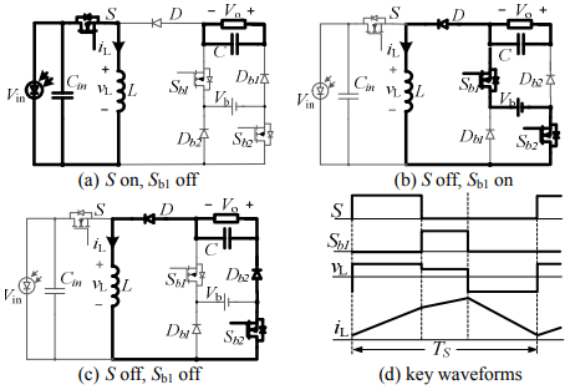
Figura 15 – Etapas de operação do modo em que o painel fotovoltaico fornece energia a carga e para a bateria



Fonte: Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018).

O segundo modo de operação ocorre quando tanto a bateria quando os painéis fotovoltaicos alimentam a carga, como ilustrado na Figura 16. Na primeira e na segunda etapa, o indutor é carregado com energia vindo do painel fotovoltaico e da bateria, respectivamente. Este indutor será descarregado na terceira etapa, alimentando a carga

Figura 16 – Etapas de operação em que o fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga

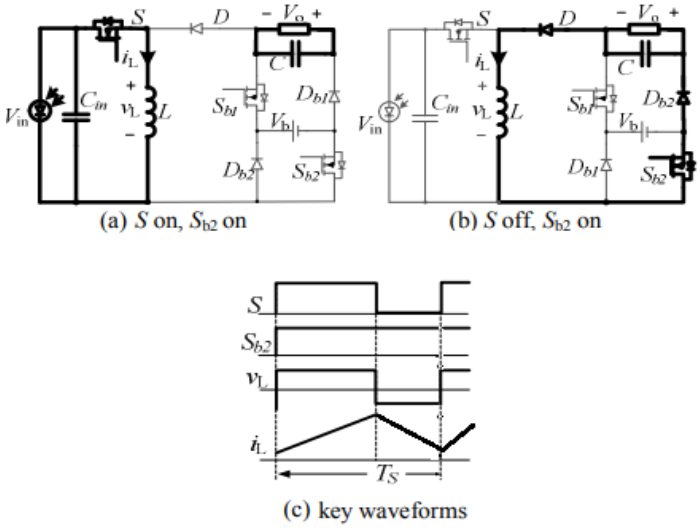


Fonte: Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018).

Já no terceiro modo de operação há o fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga, ilustrado na Figura 17. Este modo é o simples *buck-boost*, em que na primeira etapa há o carregamento do indutor pelo painel fotovoltaico e na segunda etapa há a

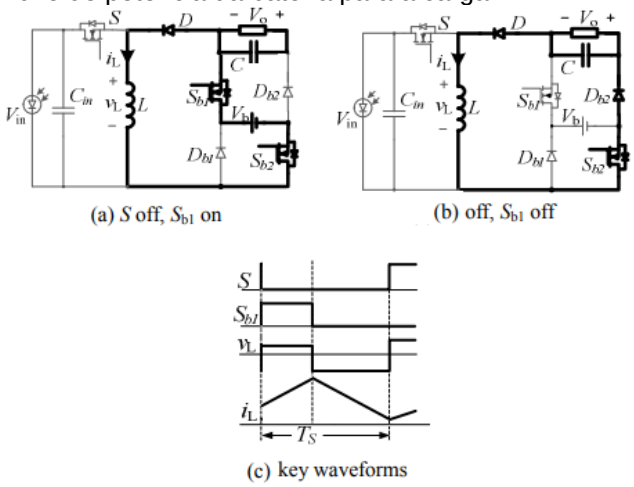
descarga de energia do indutor para a carga. Existe também o modo em que a bateria alimenta a carga sozinha, como ilustrado na Figura 18. Como no modo anterior, também é um simples *buck-boost*.

Figura 17 – Etapas de operação no modo em que o fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga



Fonte: Adaptado de Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018).
Nota: Modificado pelo autor.

Figura 18 – Etapas de operação no modo em que o fluxo de potência da bateria para a carga

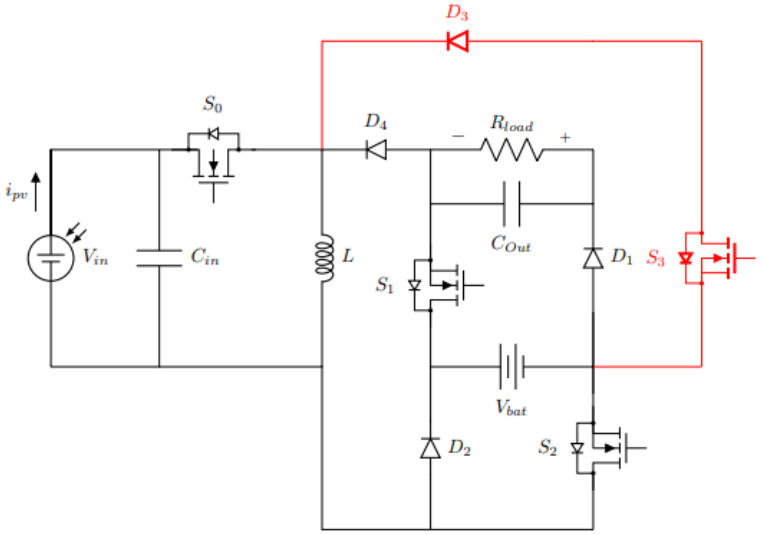


Fonte: Adaptado de Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018).
Nota: Modificador pelo autor.

No conversor apresentado, existem duas desvantagens importantes. Uma delas é não existir um caminho para que a bateria seja carregada separadamente da carga, ou seja, não é possível a operação ilustrada pela Figura 8. Para que este conversor consiga carregar a bateria separadamente, é necessária uma modificação. A inserção

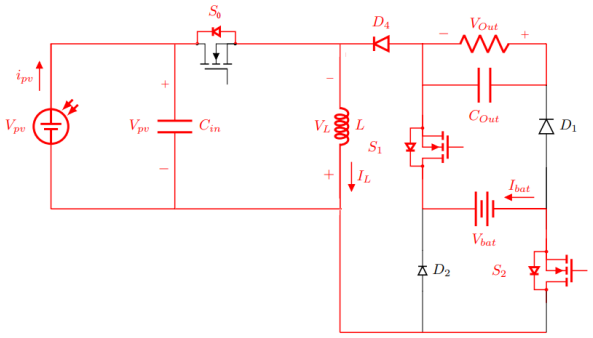
de uma chave e um diodo na saída da bateria, possibilita um novo caminho para o fluxo de energia de painel fotovoltaico para a carga. A Figura 19 ilustra a modificação e o caminho obtido. O diodo D_3 foi inserido em série com a chave para garantir que este novo caminho seja unidirecional em corrente. Com estas adições, há uma topologia modificada que cumpre todas as possibilidades de fluxo de potência entre painel fotovoltaico, bateria e carga e ainda não há restrições para o valor da tensão nos terminais do painel fotovoltaico, sendo duas melhorias do proposto no trabalho de Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018). O conversor proposto está ilustrado na Figura 22. Ele pode operar em seis modos diferentes, com cada modo tendo uma forma de fluxo de potência entre as portas.

Figura 19 – Topologias buck-boost com a célula ponte H com bateria proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) com uma adição de uma chave S_3 e um diodo D_3



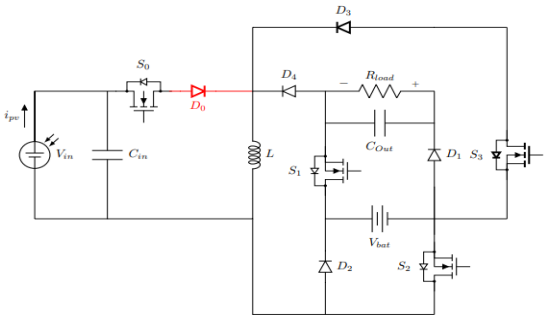
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20. – Situação quando a tensão da bateria é maior do que a tensão nos terminais do painel fotovoltaico



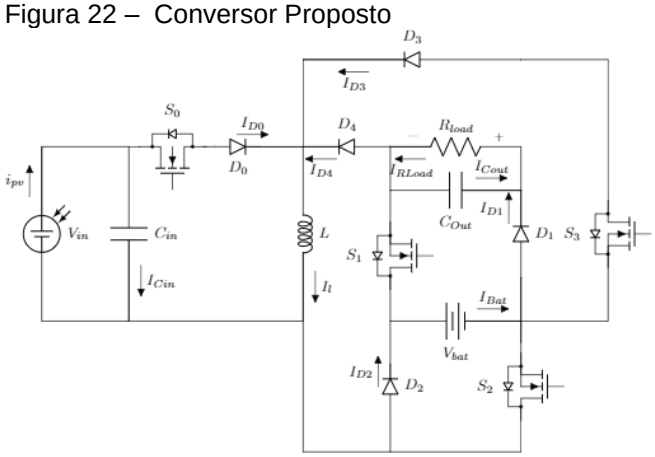
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Topologias buck-boost com a célula ponte H com bateria proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018) com uma adição do diodo D_0, em vermelho, em série com a chave S_0



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 – Conversor Proposto



Fonte: Produção do próprio autor.

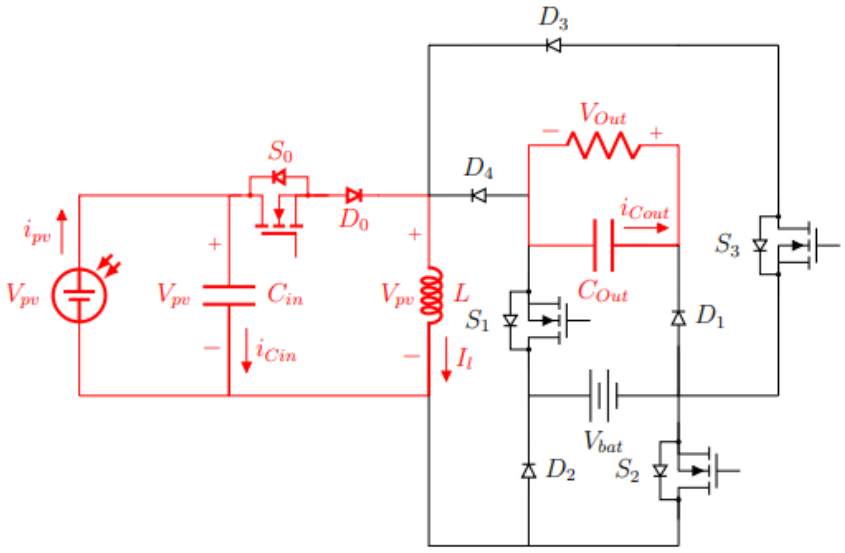
2.2 Modo 1 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

2.2.1 Etapas de operação

A análise do conversor operando no modo 1, ou seja, com o objetivo de carregar a bateria e a carga, é composto por três etapas. A etapa 1 está ilustrada na Figura 23. Quando a chave S_0 é acionada, há a transferência de energia do painel fotovoltaico para o indutor. As equações de estado da corrente no capacitor de entrada, I_{Cin}, da corrente no capacitor de saída, I_{Cout}, da tensão no indutor, V_l, e da corrente na bateria, V_l, na etapa 1 estão descritas nas equações (1), (2), (3) e (4). As equações estão relacionadas aos valores e correntes e tensões nos elementos do circuito,

indicados na Figura 23 como a V_{Cin}, a tensão no capacitor de entrada, I_{pv}, a corrente do painel fotovoltaico, I_l, a corrente no indutor, V_{Cout}, a tensão do capacitor de saída e V_{pv}, a tensão do painel fotovoltaico. L, R_{Load}, C_{in} e C_{Out} são o valor da indutância no indutor, o valor da resistência no circuito e o valor da capacitância de entrada e de saída, respectivamente.

Figura 23 – Etapa 1 da topologia proposta do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

$$\boldsymbol{I_{Cin} = C_{in} * \frac{dV_{Cin}}{dt} = I_{pv} - I_l} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{I_{Cout} = C_{Out} * \frac{dV_{Cout}}{dt} = \frac{-V_{Cout}}{R_{Load}} = \frac{-V_{Out}}{R_{Load}}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{V_l = L * \frac{dI_l}{dt} = V_{Cin} = V_{pv}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{I_{bat} = 0\ A} \tag{4}$$

O esforço de tensão e corrente em cada chave estão descritos pelas equações (5) até (12), em que V_{S0} e I_{S0} representam o esforço de tensão e corrente na chave S_0, V_{S1} e I_{S1} representam o esforço de tensão e corrente na chave S_1, V_{S2} e representam o

esforço de tensão e corrente na chave S_2 e V_{S3} e I_{S3} representam o esforço de tensão e corrente na chave S_3. As indicações das chaves estão ilustradas na Figura 22.

$$V_{S0} = 0\ V \tag{5}$$

$$I_{S0} = I_l\ A \tag{6}$$

$$V_{S1} = V_b\ V \tag{7}$$

$$I_{S1} = 0\ A \tag{8}$$

$$V_{S2} = 0\ V \tag{9}$$

$$I_{S2} = 0\ A \tag{10}$$

$$V_{S3} = V_{pv}\ V \tag{11}$$

$$I_{S3} = 0\ A \tag{12}$$

O esforço de tensão e corrente em cada diodo estão descritos pelas equações (13) até (22), em que V_{D0} e I_{D0} representam o esforço de tensão e corrente na chave D_0, V_{D1} e I_{D1} representam o esforço de tensão e corrente na chave D_1,V_{D2} e I_{D2} representam o esforço de tensão e corrente na chave D_2, V_{D3} e I_{D3} representam o esforço de tensão e corrente na chave D_3 e V_{S4} e I_{S4} representam o esforço de tensão e corrente na chave D_4. As indicações das chaves estão ilustradas na Figura 22.

$$V_{D0} = 0\ V \tag{13}$$

$$I_{D0} = I_l\ A \tag{14}$$

$$V_{D1} = V_{out}\ V \tag{15}$$

$$I_{D1} = 0\ A \tag{16}$$

$$V_{D2} = V_{bat}\ V \tag{17}$$

$$I_{D2} = 0\ A \tag{18}$$

$$V_{D3} = V_{PV}\ V \tag{19}$$

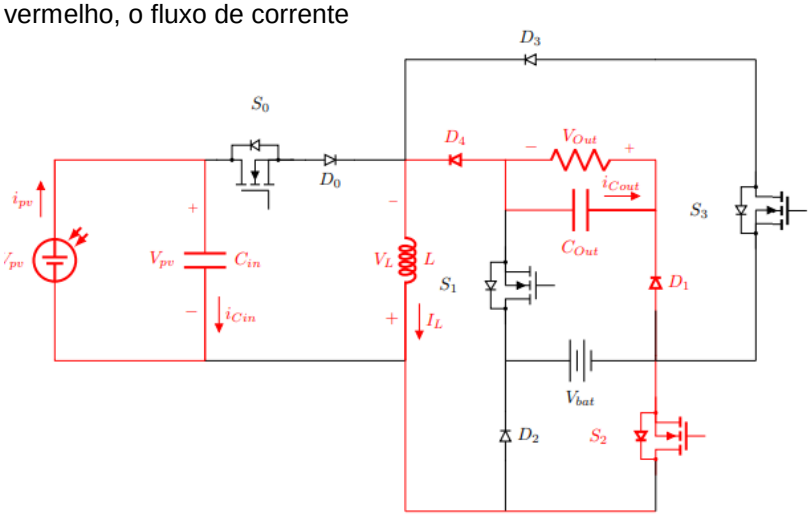
$$I_{D3} = 0\ A \tag{20}$$

$$V_{D4} = V_{PV}\ V \tag{21}$$

$$I_{D4} = 0\ A \tag{22}$$

A Etapa 2 está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Etapa 2 da topologia proposta do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse estado há a transferência da energia acumulada do indutor somente para a carga, feito a partir do acionamento da chave S_2. As equações de estado da etapa 2 estão descritas pelas equações (23) até (26).

$$\boldsymbol{I_{Cin} = C_{in} * \frac{dV_{Cin}}{dt} = I_{pv}} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{I_{Cout} = C_{Out} * \frac{dV_{Cout}}{dt} = I_l - \frac{V_{Cout}}{R_{Load}} = I_l - \frac{V_{Out}}{R_{Load}}} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{V_l = L * \frac{dI_l}{dt} = V_{Cin} = V_{Cout} = V_{Out}} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{I_{bat} = 0\ A} \tag{26}$$

O esforço de tensão e corrente em cada uma das chaves estão descritos pelas equações (27) até (34).

$$V_{S0} = V_{pv}\ V \tag{27}$$

$$I_{S0} = \ 0\ A \tag{28}$$

$$V_{S1} = V_b\ V \tag{29}$$

$$I_{S1} = 0\ A \tag{30}$$

$$V_{S2} = 0\ V \tag{31}$$

$$I_{S2} = I_l A \tag{32}$$

$$V_{S3} = V_b\ V \tag{33}$$

$$I_{S3} = 0\ A \tag{34}$$

O esforço de corrente e de tensão em cada um dos diodos estão descritos pelas equações (35) até (44).

$$V_{D0} = V_{pv}\ V \tag{35}$$

$$I_{D0} = 0\ A \tag{36}$$

$$V_{D1} = 0\ V \tag{37}$$

$$I_{D1} = I_l A \tag{38}$$

$$V_{D2} = V_b V \tag{39}$$

$$I_{D2} = 0\ A \tag{40}$$

$$V_{D3} = 0\ V \tag{41}$$

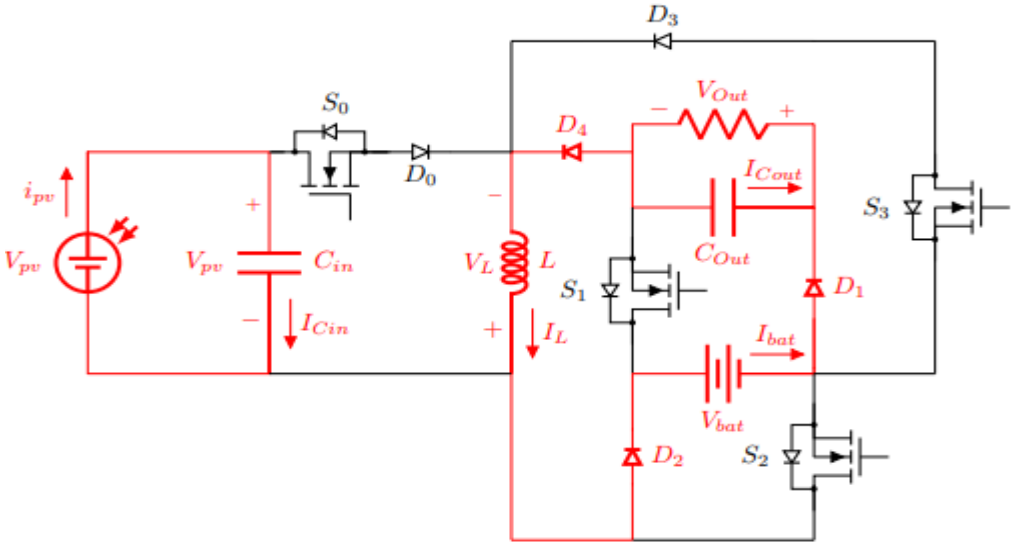
$$I_{D3} = 0\ A \tag{42}$$

$$V_{D4} = 0V \tag{43}$$

$$I_{D4} = I_l A \tag{44}$$

A Etapa 3 está ilustrada na Figura 25. Quando todas as chaves estiverem desligadas, a corrente passará pelos diodos D_2, D_1 e D_4, permitindo a passagem da corrente no indutor que alimentará a carga enquanto carrega a bateria. As equações de estado da Etapa 3 estão descritas pelas equações (45) até (49).

Figura 25 – Etapa 3 do modo 1. Em vermelho, o fluxo de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

$$I_{Cin} = C_{in} * \frac{dV_{Cin}}{dt} = I_{pv} \tag{45}$$

$$I_{Cout} = C_{Out} * \frac{dV_{Cout}}{dt} = I_l - \frac{V_{Cout}}{R_{Load}} = I_l - \frac{V_{Out}}{R_{Load}} \tag{46}$$

$$V_l = L * \frac{dI_l}{dt} = V_{Cin} = -V_{Cout} - V_{bat} = -V_{Out} - V_{Bat} \tag{47}$$

$$I_{bat} = I_l \tag{48}$$

O esforço de tensão e corrente nas chaves estão descritos pelas equações (49) até (56).

$$V_{s0} = V_{pv}\ V \tag{49}$$

$$I_{S0} = 0\ A \tag{50}$$

$$V_{s1} = V_b\ V \tag{51}$$

$$I_{S1} = 0\ A \tag{52}$$

$$V_{s2} = 0\ V \tag{53}$$

$$I_{S2} = 0\ A \tag{54}$$

$$V_{s3} = V_{pv}\ V \tag{55}$$

$$I_{S3} = 0\ A \tag{56}$$

O esforço de tensão e corrente nos diodos estão descritos pelas equações (57) até (66).

$$V_{D0} = V_{pv}\ V \tag{57}$$

$$I_{D0} = 0\ A \tag{58}$$

$$V_{D1} = 0\ V \tag{59}$$

$$I_{D1} = I_l\ A \tag{60}$$

$$V_{D2} = 0\ V \tag{61}$$

$$I_{D2} = I_l\ A \tag{62}$$

$$V_{D3} = 0\ V \tag{63}$$

$$I_{D3} = 0\ A \tag{64}$$

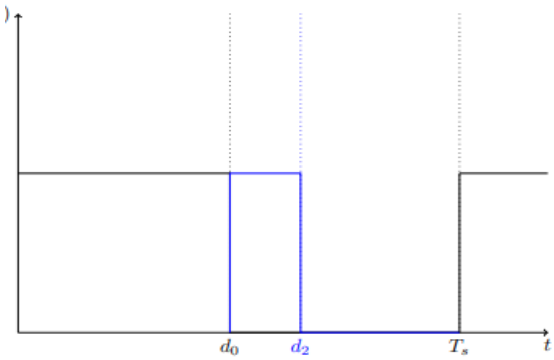
$$V_{D4} = 0\ V \tag{65}$$

$$I_{D4} = I_l\ A \tag{66}$$

2.2.2 Formas de onda

As formas de onda dos acionamentos das chaves estão ilustradas na Figura 26.

Figura 26 – Forma de onda do acionamento das chaves

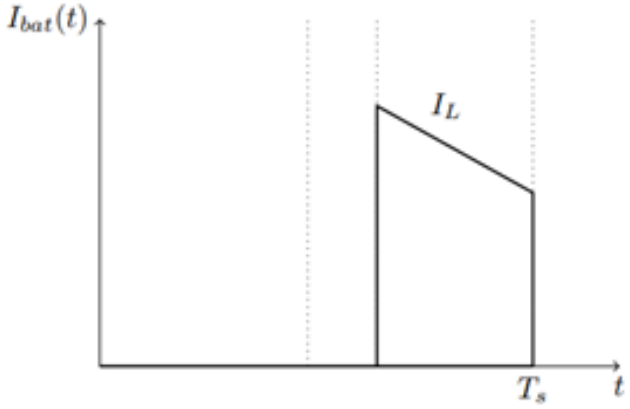


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 27, a forma de onda teórica da corrente na bateria está ilustrada. É uma corrente pulsada, tendo o valor igual à da corrente no indutor no instante de tempo entre d_2, razão cíclica da chave S_2, e T_s, período de chaveamento. E é positiva pois a bateria está se carregando.

.

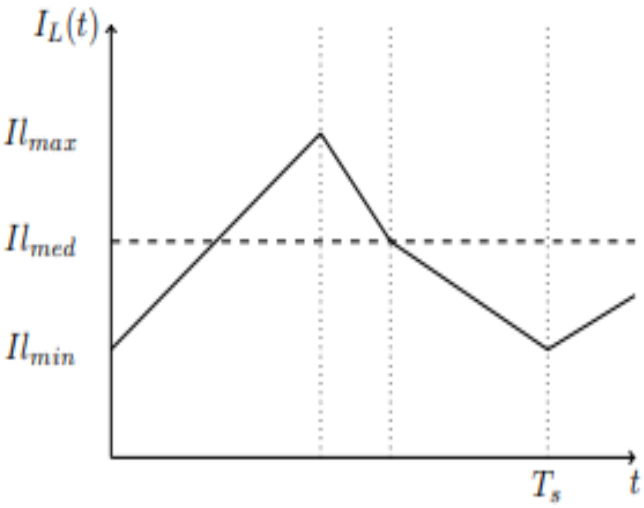
Figura 27 – Forma de onda da corrente na bateria



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 28, a forma de onda teórica da corrente no indutor. Há uma variação da derivada após d_0 pois neste intervalo de tempo há dois períodos de descarga, uma para a tensão de saída e depois para a soma da tensão de saída mais a tensão da bateria. A forma de onda teórica da corrente no capacitor de entrada está ilustrada na Figura 29.

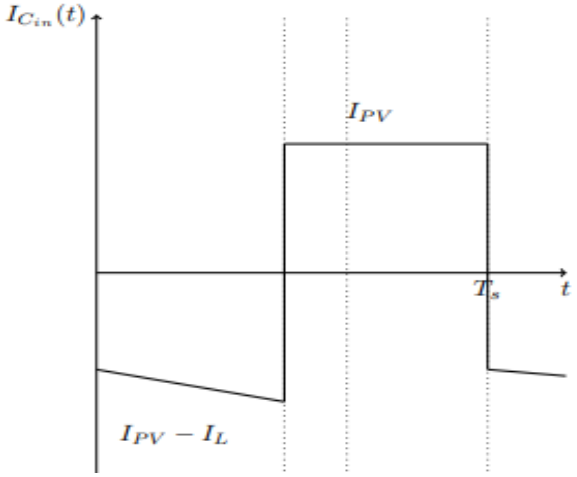
Figura 28 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

Inicialmente sendo a corrente no indutor menos a corrente de entrada, a corrente I_{pv}, pois é o período em que há o carregamento do indutor e a chave S_0 estiver acionada. Após a abertura da chave, somente fica com o valor da corrente de entrada.

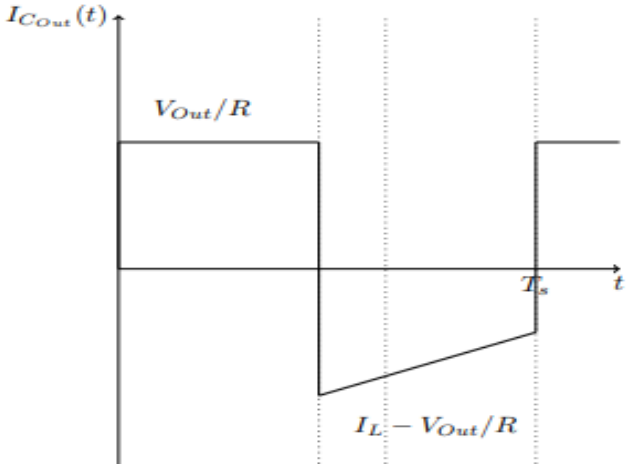
Figura 29 –, Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de saída está ilustrada na Figura 30. Inicialmente sendo a corrente da carga, do início do período até d_0, razão cíclica da chave S_2 e depois sendo o valor da corrente no indutor menos a corrente da carga, de d_0 até o fim do período, sendo neste intervalo de tempo o momento de carregamento do indutor.

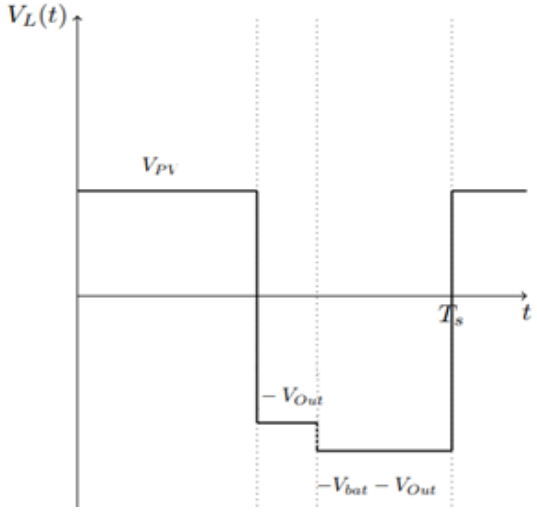
Figura 30 – Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 31, representando as tensões que carregam o indutor, V_{pv} sendo positiva, e as tensões relacionadas a descarga do indutor, V_{out} e V_{bat}, a tensão na bateria, sendo negativas.

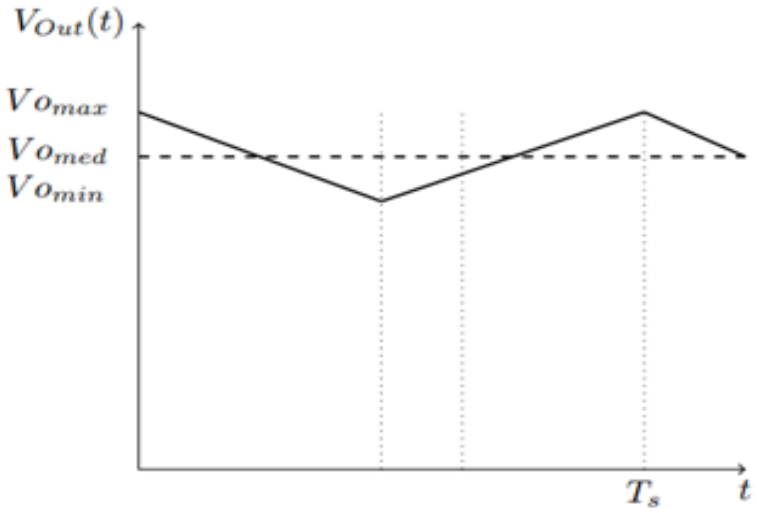
Figura 31 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

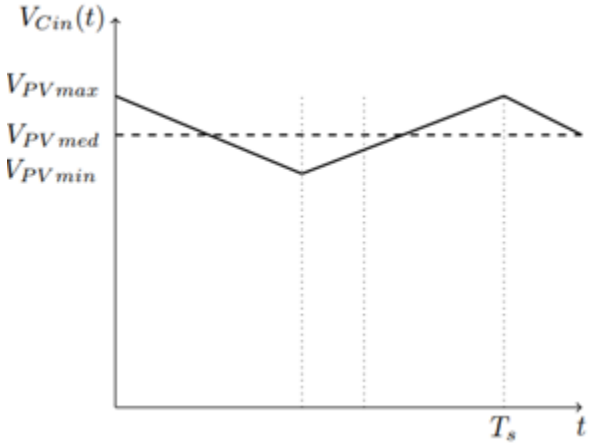
As Figuras 32 e 33 ilustram as formas de onda de tensão no capacitor de saída e entrada, com a representação de suas oscilações.

Figura 32 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 33 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 1



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.3 Ganho estático

Seja a forma de onda da forma de onda da tensão no indutor descrita pela Figura 31.A equação do valor médio no indutor é descrita pela equação (67).

$$\frac{1}{T}\int_0^{T_s} V_l * dt = \int_0^{d_0 * T_s} V_{Cin} * dt + \int_{d_2 * T_s}^{d_0 * T_s} -V_{Cout} * dt + \int_{d_2 * T_s}^{d_0 * T_s} -V_{Cout} - V_{Bat} * dt \quad \textbf{(67)}$$

Como a tensão média do indutor é igual a zero, a solução é descrita pelas equações (68) até (70).

$$0 = V_{Cin}(d_{0*}T_s) - V_{Cout}(T_s - d_{0*}T_s) - V_{Bat}(T_s - d_{2*}T_s) \quad (68)$$

$$0 = V_{Cin}(d_0) - V_{Cout}(1 - d_0) - V_{Bat}(1 - d_2) \quad (69)$$

$$V_{Cout} = \frac{V_{Cin}(d_0) - V_{Bat}(1 - d_2)}{(1 - d_0)} \quad (70)$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser descrito pela equação (71).

$$\boldsymbol{V_{out} = \frac{V_{PV}(d_0) - V_{Bat}(1 - d_2)}{(1 - d_0)}} \tag{71}$$

2.2.4 Ondulação da corrente no indutor

Pela forma da onda da corrente no indutor, há uma variação de corrente em estado de condução. Assim, para a etapa 1, a ondulação de corrente, ΔI_{LE1}, pode ser determinada pelos passos mostrados da equação (72) e (73).

$$\boldsymbol{\int_0^{d_0 * T_s} dI_l = \int_0^{d_0 * T_s} \frac{V_l(t)}{L} dt} \tag{72}$$

$$\boldsymbol{\Delta I_{LE1} = \frac{V_{pv.} d_0 . T_s}{L} = \frac{V_{pv} . d_0}{Lf}} \tag{73}$$

E assim, com o mesmo procedimento, as respectivas variações de corrente no indutor nas etapas 2 e 3, ΔI_{LE2} e ΔI_{LE3}, respectivamente, são descritos pelas equações (74) e (75), respectivamente.

$$\boldsymbol{\Delta I_{LE2} = -\frac{V_{Cout} . (d_2 - d_0) . T_s}{L} = -\frac{V_{Out} . (d_2 - d_0) . T_s}{L}} \tag{74}$$

$$\boldsymbol{\Delta I_{LE3} = -\frac{(V_{Bat} + V_{Cout}) . (1 - d_2) . T_s}{L} = -\frac{(V_{Bat} + V_{Cout}) . (1 - d_2)}{L * f}} \tag{75}$$

2.2.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor, I_{Lmin}, pode ser obtida a partir do valor médio da corrente no capacitor de saída, como descrito pelas equações (76) e (77).

$$\boldsymbol{\frac{1}{T} \int_0^{T_s} I_{Cout} . dt = \int_0^{d_0 * T_s} I_{Out} . dt + \int_{d_0 * T_s}^{T_s} -I_l(t) + I_{Out} \ . dt} \tag{76}$$

$$\boldsymbol{I_{Lmin}} = \frac{\boldsymbol{I_o}}{(\boldsymbol{1-d_0})} - \Delta \boldsymbol{I_{lE2}}.\frac{\boldsymbol{0,5*(d_2-d_0)}}{(\boldsymbol{1-d_0})} \\ -\Delta \boldsymbol{I_{lE3}}.\boldsymbol{0,5}.(\boldsymbol{d_2}.\boldsymbol{0,5-d_0+0,5}) \tag{77}$$

Deste modo, o valor médio da corrente no indutor, I_{Lmed}, é descrito pela equação (78).

$$\boldsymbol{I_{Lmed}} = \boldsymbol{I_{LMin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE1}}.\boldsymbol{0,5} \tag{78}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é descrita pelo da equação (79) até (84).

$$\boldsymbol{I_{Lef}^2} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T}}.\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_l}\ (\boldsymbol{t})]\boldsymbol{dt} \tag{79}$$

$$\boldsymbol{I_{Lef}^2} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T_s}} * \left[\left(\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{d_0*Ts}} \left[\boldsymbol{I_{Lmin}} + \frac{\boldsymbol{V_{pv}}}{\boldsymbol{L}}.\boldsymbol{t}\right]^{\boldsymbol{2}}\right)\boldsymbol{dt} \\ + \left(\int_{\boldsymbol{d_0*Ts}}^{\boldsymbol{d_2*Ts}} \left[(\boldsymbol{I_{Lmin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE1}}) - \frac{\boldsymbol{V_{out}}}{\boldsymbol{L}}.\boldsymbol{t}\right]^{\boldsymbol{2}}\right).\boldsymbol{dt} \\ + \left(\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{d_0*Ts}} \left[(\boldsymbol{I_{Lmin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE2}}) - \frac{(\boldsymbol{V_{out}} + \boldsymbol{V_{bat}})}{\boldsymbol{L}} * \boldsymbol{t}\right]^{\boldsymbol{2}}\right)\right] \tag{80}$$

$$\boldsymbol{I_{Lef}} = \sqrt{\boldsymbol{a+b+c}} \tag{81}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{3}}(\boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}}.\Delta \boldsymbol{I_{lE1}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE1}^2}) \tag{82}$$

$$\boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{d_2-d_0}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right) + \boldsymbol{3}.\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right).\Delta \boldsymbol{I_{lE2}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE2}^2}) \tag{83}$$

$$= \frac{\boldsymbol{1-d_2}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}} * \Delta \boldsymbol{I_{lE3}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE3}^2}) \tag{84}$$

2.2.6 Corrente no capacitor de entrada

O valor médio da corrente no capacitor de entrada, I_{Cinmed}, é descrito pela equação (85).

$$\boldsymbol{I_{Cinmed} = \frac{1}{T}\int_{0}^{Ts}[I_{Cin}].dt} \tag{85}$$

Por definição, o valor médio da corrente no capacitor é igual a zero. O valor médio da corrente de entrada pode ser calculado pelo processo demonstrado nas equações (86), (87) e (88).

$$\boldsymbol{\frac{1}{T}\int_{0}^{Ts}[I_{Cin}].dt = 0} \tag{86}$$

$$\boldsymbol{\frac{d_0}{2}.\left(2.\left(I_{pv} - I_{Lmin}\right) + \Delta I_{lE1}\right) + (1 - d_0).I_{pv} = 0} \tag{87}$$

$$\boldsymbol{I_{pv} = d_0.(I_{Lmin} - \frac{\Delta I_{lE1}}{2})} \tag{88}$$

O valor eficaz da corrente no capacitor de entrada, I_{Cinef}, é descrito pelas equações (89) até (91).

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}\left[I^2_{Cin}(t)\right] * dt} \tag{89}$$

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{1}{T}.\left(\int_{0}^{d0*Ts}[I_{pv} - I_l(t)]^2\, dt + \int_{d0*Ts}^{Ts}[I_{pv}]^2\, dt\right)} \tag{90}$$

$$\boldsymbol{I_{CinRMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3} * \left(3 * [I_{pv} - I_{Lmin}]^2 + 3 * [I_{pv} - I_{Lmin}] * \Delta I_{lE1} + \Delta I^2_{LE1}\right) + (1 - d_0) * I^2_{pv}}} \tag{91}$$

2.2.7 Corrente no capacitor de saída

O valor eficaz da corrente é descrito pelas equações (92) até (97).

$$\boldsymbol{I^2_{CoutRMS} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}\left[I^2_{Cout}(t)\right].dt} \tag{92}$$

$$I_{CoutRMS}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d0*Ts}[I_o]^2\right).dt + \left(\int_{d0*Ts}^{d2*Ts}[(I_L(t) + I_o)]^2\right)dt + \left(\int_0^{Ts}[(I_L(t) + I_o)]^2\right)\right] \quad (93)$$

$$I_{CoutRMS} = \sqrt{a + b + c} \quad (94)$$

$$a = d_o I_o^2 \quad (95)$$

$$b = \frac{d_2 - d_0}{3}.\left(3.\left[I_o - \left(I_{Lmin} + \Delta I_{lE3}\right)\right] + 3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}^2 + \Delta I_{lE3}\right)\right].\Delta I_{lE2} + \Delta I_{LE2}^2\right) \quad (96)$$

$$c = \frac{1 - d_2}{3}.\left(3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}\right)\right]^2.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2\right) \quad (97)$$

2.2.8 Corrente na bateria

Valor médio da corrente na bateria, I_{batMed}, é descrito pelas equações (98) e (99).

$$I_{batMed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d_2.Ts}^{Ts} I_l(t)dt \quad (98)$$

$$I_{batMed} = \frac{1 - d_2}{2}.\left[2.\left((I_{lmin})\right) + \Delta I_{lE3}\right) \quad (99)$$

O valor eficaz da corrente na bateria, I_{BatRMS}^2, descritos pelas equações (100) e (101).

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{Ts}[I_{Bat}(t)]^2\,dt\right) = \frac{1}{T}.\left(\int_{d_2*Ts}^{Ts}[I_l(t)]^2\,dt\right) \quad (100)$$

$$I_{BatRMS} = \sqrt{\frac{1 - d_2}{3}.\left(3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.[I_o]^2.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2\right)} \quad (101)$$

2.2.9 Correntes nas chaves

O valor médio da corrente na chave S_0, I_{S0Med}, é descrito pelas equações (102) e (103).

$$\mathbf{I_{S0Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S0}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0}.\mathbf{Ts}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{102}$$

$$\boldsymbol{I_{S0Med}} = \frac{\boldsymbol{d_0}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left((\boldsymbol{I_{lmin}})\right) + \Delta \boldsymbol{I_{lE1}}\right) \tag{103}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_0, I_{S0RMS}, descritos pelas equações (104) e (105).

$$\boldsymbol{I^2_{S0RMS}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0}.\mathbf{Ts}} [\mathbf{I_l(t)}]^{\mathbf{2}}\mathbf{dt} \tag{104}$$

$$\mathbf{I^2_{S0RMS}} = \sqrt{\frac{\mathbf{d_0}}{\mathbf{3}} * (\mathbf{3} * \left[\left(\mathbf{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3} * \left[\left(\mathbf{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}} * \Delta\mathbf{I_{lE1}} + \Delta\mathbf{I^2_{LE1}}} \tag{105}$$

O valor médio da corrente na chave S_2, I_{S2Med}, é descrito pelas equações (106) e (107).

$$\mathbf{I_{S2Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S2}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{d_0.Ts}}^{\mathbf{d_2.Ts}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{106}$$

$$\mathbf{I_{S2Med}} = \frac{\mathbf{d_2} - \mathbf{d_0}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left((\mathbf{I_{lmin}} + \Delta\mathbf{I_{lE3}})\right) + \Delta\mathbf{I_{lE1}}\right) \tag{107}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_2, I^2_{S2RMS}, descritos pelas equações (108) e (109).

$$\boldsymbol{I^2_{S2RMS}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_{S2}(t)}]^{\mathbf{2}}\, \boldsymbol{dt}\right) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\mathbf{d_0}.\boldsymbol{Ts}}^{\mathbf{d_2}.\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_l(t)}]^{\mathbf{2}}\, \boldsymbol{dt}\right) \tag{108}$$

$$\mathbf{I_{S2RMS}} = \sqrt{\frac{\mathbf{d_2} - \mathbf{d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\mathbf{I_{Lmin}} + \Delta\mathbf{I_{lE3}}\right)\right]\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3}.\left[\left(\mathbf{I^2_{Lmin}} + \Delta\mathbf{I_{lE3}}\right)\right].\Delta\mathbf{I_{lE2}} + \Delta\mathbf{I^2_{LE2}}\right)} \tag{109}$$

Não há condução de corrente nas chaves S_1 e S_3, logo tanto o valor eficaz e médio da corrente são iguais a zero

2.2.10 Correntes nos diodos

Os valores de corrente no diodo D_0, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_0, estando descritos nas equações (103) e (105).

O valor médio da corrente no diodo D1, I_{D1Med}, é descrito pelas equações (110) e (111).

$$\mathbf{I_{D1Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{d2}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{d0Ts}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{110}$$

$$\mathbf{I_{D1Med}} = \frac{\mathbf{d_2 - d_0}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left(\left(\mathbf{I_{lmin}} + \Delta\mathbf{I_{lE3}}\right)\right) + \Delta\mathbf{I_{lE1}}\right) + \frac{\mathbf{1 - d_2}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left(\left(\mathbf{I_{lmin}}\right)\right) + \Delta\mathbf{I_{lE1}}\right) \tag{111}$$

O valor eficaz da corrente no Diodo D1, I_{D1RMS} , descrito pelas equações (112) e (113).

$$\boldsymbol{I_{D1RMS}^2} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_{D2}(t)}]^2\, \boldsymbol{dt}\right) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\boldsymbol{d_0.Ts}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_l(t)}]^2\, \boldsymbol{dt}\right) \tag{112}$$

$$\boldsymbol{I_{D1RMS}} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{d_2 - d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}} + \Delta\boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right]\right]^2 + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta\boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right].\Delta\boldsymbol{I_{lE2}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE2}^2}\right) + \frac{\mathbf{1 - d_2}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]\right]^2 + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2}\right)\right].\Delta\boldsymbol{I_{lE3}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE3}^2}\right)} \tag{113}$$

O valor médio da corrente no Diodo D2, I_{D2Med}, são descritos pelas equações (114) e (115).

$$\mathbf{I_{D2Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{1(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\boldsymbol{d_2.Ts}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{114}$$

$$\boldsymbol{I_{d2Med}} = \frac{\mathbf{1 - d_2}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left(\left(\boldsymbol{I_{lmin}}\right)\right) + \Delta\boldsymbol{I_{lE1}}\right) \tag{115}$$

O valor eficaz da corrente no Diodo D2, I_{D2RMS}, descrito pelas equações (116) e (117).

$$\boldsymbol{I_{D2RMS}^2} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_{D1}(t)}]^2\, \boldsymbol{dt}\right) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\boldsymbol{d_2.Ts}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_l(t)}]^2\, \boldsymbol{dt}\right) \tag{116}$$

$$\boldsymbol{I_{D2RMS}} = \sqrt{\frac{\mathbf{1 - d_2}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]\right]^2 + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2}\right)\right].\Delta\boldsymbol{I_{lE3}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE3}^2}\right)} \tag{117}$$

Os valores de corrente no diodo D_4, tanto eficaz quanto médio, são iguais às do diodo D_1, estando descritos nas equações (111) e (113).

Não há condução de corrente no diodo D_3, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

2.2.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução.

A variação máxima ocorre do intervalo de tempo zero até o intervalo de tempo d_0, assim a variação de tensão do capacitor de saída, ΔV_{Cout}, pode ser descrita pelas equações (118) e (119).

$$\int_{0}^{d_0 . T_s} dV_{Cout} = \int_{0}^{d_0 . T_s} \frac{V_{Cout}(t)}{C_{out}} . dt \tag{118}$$

$$\Delta V_{Cout} = \frac{V_{Out} . (d_0)}{R . C_{out} . f} \tag{119}$$

2.2.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo d_0 até o intervalo de tempo T_s, assim, a variação de tensão da corrente de entrada, ΔV_{Cin}, pode ser descrita pelas equações (120) e (121).

$$\int_{d0 * Ts}^{Ts} dV_{Cin} = \int_{d0 * Ts}^{Ts} \frac{V_{Cin}(t)}{C_{in}} * dt \tag{120}$$

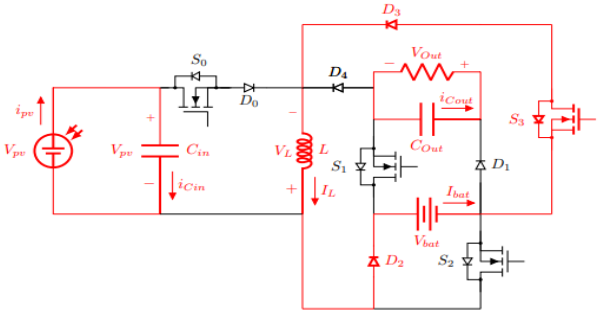
$$\Delta V_{Cin} = \frac{I_{pv} * (1 - d_0)}{C_{in} * f} \tag{121}$$

2.3 Modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

2.3.1 Etapas de operação

Neste modo, não há um estado em que tanto a carga quanto a bateria são alimentadas ao mesmo tempo, diferente do primeiro modo. Aqui, há um estado de carregamento da bateria e no outro momento há somente fornecimento de energia para a carga. Neste modo há três etapas de operação. A etapa 1 e a etapa 2 do modo 2 é igual as etapas 1 e 2 do modo 1, ver em 2.2.1. A etapa 3 está ilustrada na Figura 34.

Figura 34 – Etapa 3 da topologia proposta. Em vermelho, o fluxo de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse estado o indutor é carregado pela bateria com o acionamento das chaves S_2 e S_1. As equações de estado da etapa 3 estão descritas por (122) até (125).

$$\boldsymbol{I_{Cin} = C_{in} * \frac{dV_{Cin}}{dt} = I_{pv}} \tag{122}$$

$$\boldsymbol{I_{Cout} = C_{Out} * \frac{dV_{Cout}}{dt} = -\frac{V_{Cout}}{R_{Load}} = -\frac{V_{Out}}{R_{Load}}} \tag{123}$$

$$\boldsymbol{V_l = L * \frac{dI_l}{dt} = V_{Cin} = -V_{bat}} \tag{124}$$

$$\boldsymbol{I_{bat} = I_l} \tag{125}$$

Os esforços nas chaves estão descritos pelas equações (126) até (133).

$$V_{S0} = V_{pv}\ V \tag{126}$$

$$I_{S0} = 0A \tag{127}$$

$$V_{S1} = V_b\ V \tag{128}$$

$$I_{S1} = 0\ A \tag{129}$$

$$V_{S2} = V_b\ V \tag{130}$$

$$I_{S2} = 0\ A \tag{131}$$

$$V_{S3} = 0\ V \tag{132}$$

$$I_{S3} = I_l\ A \tag{133}$$

Os esforços nos diodos estão descritos pelas equações (134) até (143).

$$V_{D0} = V_{pv}\ V \tag{134}$$

$$I_{D0} = 0\ A \tag{135}$$

$$V_{D1} = V_{Out}\ V \tag{136}$$

$$I_{D1} = 0\ A \tag{137}$$

$$V_{D2} = 0\ V \tag{138}$$

$$I_{D2} = I_l A \tag{139}$$

$$V_{D3} = 0\ V \tag{140}$$

$$I_{D3} = I_l A \tag{141}$$

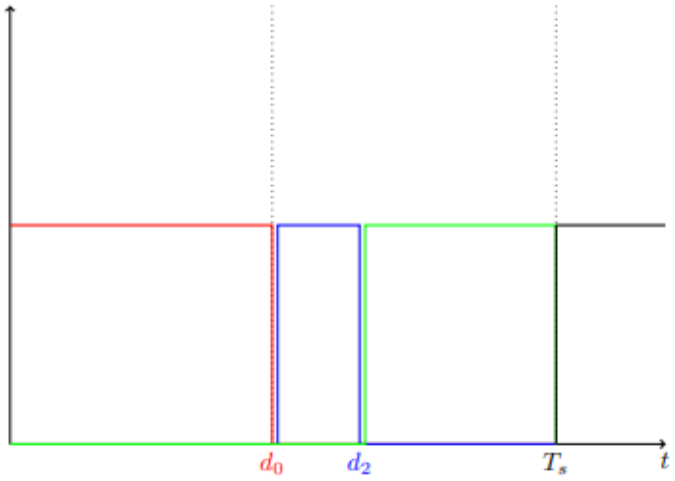
$$V_{D4} = 0\ V \tag{142}$$

$$I_{D4} = 0\ A \tag{143}$$

2.3.2 Formas de onda

As formas de onda dos acionamentos das chaves estão ilustradas na Figura 35.

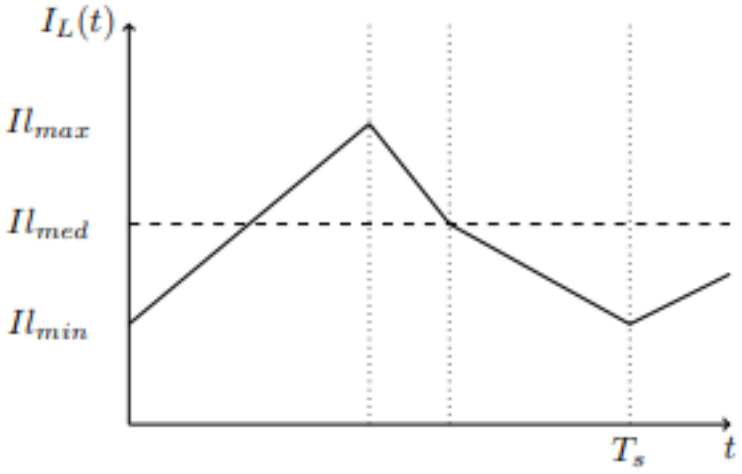
Figura 35 – Forma de onda do acionamento das chaves no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 36, a forma de onda teórica da corrente no indutor. Há uma variação da derivada após d_0 pois neste intervalo de tempo há dois períodos de descarga, uma para a tensão de saída, entre d_0 e d_2, e depois para a soma da tensão de saída mais a tensão da bateria, de d_2 até T_s.

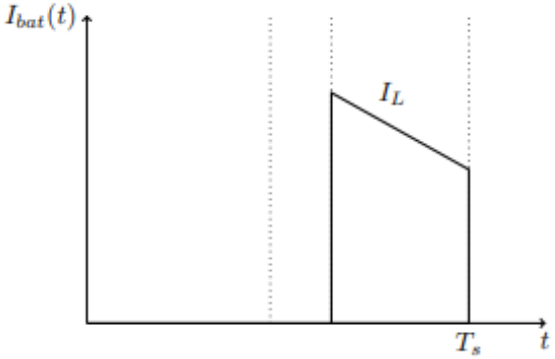
Figura 36 –Forma de onda da corrente no indutor no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 37, a forma de onda teórica da corrente na bateria está ilustrada. É uma corrente pulsada, tendo o valor igual à da corrente no indutor entre d_2 e T_s. E é positiva pois a bateria está se carregando.

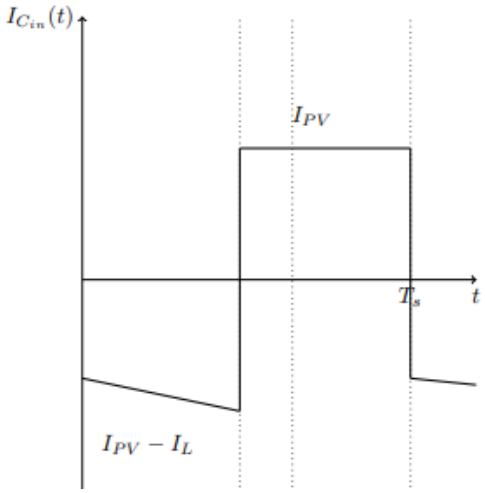
Figura 37 –Forma de onda da corrente na bateria no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de entrada está ilustrada na Figura 38. Inicialmente sendo a corrente no indutor menos a corrente de entrada, a corrente I_{pv}, pois é o período em que há o carregamento do indutor e a chave S_0 estiver acionada. Após a abertura da chave, somente fica com o valor da corrente de entrada.

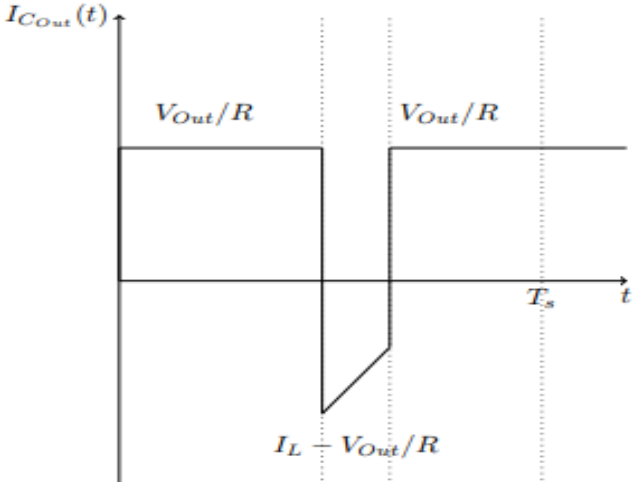
Figura 38 –Forma de onda do capacitor de entrada no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de saída está ilustrada na Figura 39. Inicialmente sendo a corrente da carga, do início do período até d_0, e depois sendo o valor da corrente no indutor menos a corrente da carga, de d_0 até d_2, sendo neste intervalo de tempo o momento de carregamento do indutor. Volta a ser a corrente da carga depois de d_2 até o fim do período.

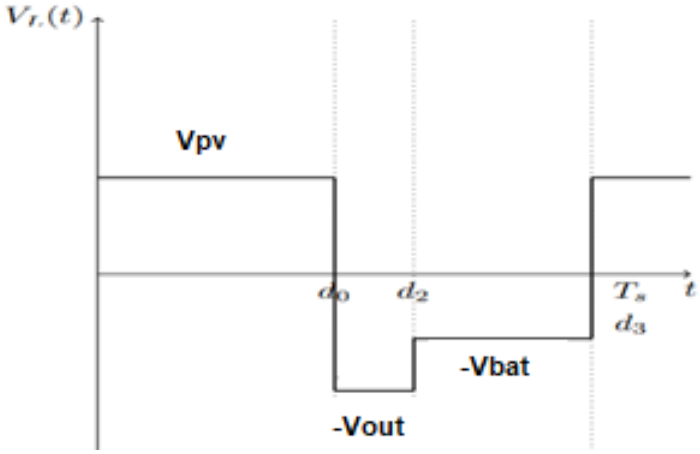
Figura 39 – Forma de onda do capacitor de entrada no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 40, representando as tensões que carregam o indutor, sendo positiva, e as tensões relacionadas a descarga do indutor, sendo negativas.

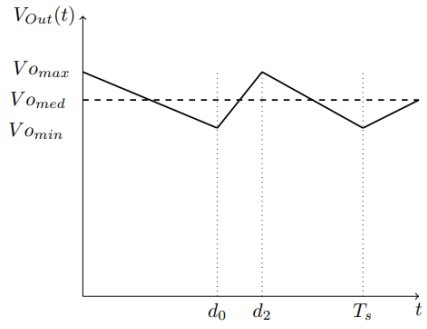
Figura 40 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

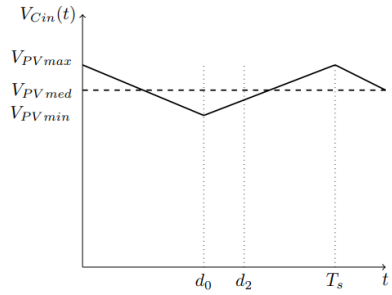
As formas de onda dos capacitores de entrada e saída estão ilustradas nas Figuras 41 e 42, respectivamente.

Figura 41 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 42 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 2



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.3 Ganho estático

Seja a forma de onda da forma de onda da tensão no indutor descrita pela Figura 46.

A equação do valor médio no indutor é descrita pela equação (143).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} V_l.dt = \int_{0}^{d_0.T_s} V_{Cin}.dt + \int_{d_2.T_s}^{d_0.T_s} -V_{Cout}.dt + \int_{d_2*T_s}^{T_s} -V_{Bat}.dt \qquad (143)$$

Como a tensão média do indutor é igual a zero, a solução é descrita pelas equações (144) até (146).

$$0 = V_{Cin}.(d_{0*}T_s) - V_{Cout}.(d_{2*}T_s - d_{0*}T_s) - V_{Bat}.(T_s - d_{2*}T_s) \qquad (144)$$

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Cout}}.(\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_2}) \tag{145}$$

$$\boldsymbol{V_{Cout}} = \frac{\boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_2})}{(\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0})} \tag{146}$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser descrito pela equação (147).

$$\boldsymbol{V_{Out}} = \frac{\boldsymbol{V_{Pv}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_2})}{(\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0})} \tag{147}$$

2.3.4 Ondulação da corrente no indutor

Pela forma da onda da corrente no indutor, há uma variação de corrente em estado de condução. Assim, para a etapa 1, a ondulação de corrente pode ser determinada pelos passos mostrados da equação (148) e (149).

$$\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0}.\boldsymbol{T_s}} \boldsymbol{dI_l} = \int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0}.\boldsymbol{T_s}} \frac{\boldsymbol{V_l}(\boldsymbol{t})}{\boldsymbol{L}}.\boldsymbol{dt} \tag{148}$$

$$\Delta \boldsymbol{I_{LE1}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}.\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{f}} \tag{149}$$

E assim, com o mesmo procedimento, as respectivas variações de corrente no indutor nas etapas 2 e 3 e são descritos pelas equações (150) e (151), respectivamente.

$$\Delta \boldsymbol{I_{LE2}} = -\frac{\boldsymbol{V_{Cout}}.(\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}).\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} = -\frac{\boldsymbol{V_{Out}}.(\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}).\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} \tag{150}$$

$$\Delta \boldsymbol{I_{LE3}} = -\frac{(\boldsymbol{V_{Bat}}).(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_1}).\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} = -\frac{(\boldsymbol{V_{Bat}}).(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_2})}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{f}} \tag{151}$$

2.3.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor pode ser obtida a partir do valor médio da corrente no capacitor de saída, como descrito pelas equações (152) e (153).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} I_{Cout}.dt = \int_{0}^{d_0.T_s} I_{Out}.dt + \int_{d_0.T_s}^{T_s} -I_l(t) + I_{Out} \ .dt \tag{152}$$

$$I_{Lmin} = \frac{I_o}{(d_2 - d_0)} - \Delta I_{lE2}.0,5 - \Delta I_{lE3} \tag{153}$$

Deste modo, o valor médio da corrente no indutor é calculado pela equação (154).

$$I_{Lmed} = I_{LMin} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{154}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é descrita pelas equações (155) até (160).

$$I_{LRMS}^2 = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts} \left[I_l\ (t)\right]^2.dt \tag{155}$$

$$\begin{aligned} I_{LRMS}^2 = \frac{1}{T_s}.\Bigg[& \left(\int_{0}^{d_0*Ts} \left[I_{Lmin} + \frac{V_{pv}}{L}.t\right]^2\right).dt \\ & + \left(\int_{d_0*Ts}^{d_2*Ts} \left[(I_{Lmin} + \Delta I_{lE1}) - \frac{V_{out}}{L}.t\right]^2\right).dt \\ & + \left(\int_{0}^{d_0*Ts} \left[(I_{Lmin} + \Delta I_{lE2}) - \frac{(V_{bat})}{L}.t\right]^2\right)\Bigg] \end{aligned} \tag{156}$$

$$I_{LRMS} = \sqrt{a + b + c} \tag{157}$$

$$a = \frac{d_0}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \tag{158}$$

$$b = \frac{d_2 - d_0}{3}.(3.\left(I_{Lmin}^2 + \Delta I_{lE3}\right) + 3.\left(I_{Lmin}^2 + \Delta I_{lE3}\right).\Delta I_{lE2} + \Delta I_{LE2}^2) \tag{159}$$

$$c = \frac{1 - d_2}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3 * I_{Lmin}.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2) \tag{160}$$

2.3.6 Corrente no capacitor de entrada

O valor médio da corrente é descrito pela equação (161).

$$\boldsymbol{I_{Cinmed} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}\left[I_{Cin}\right].dt} \tag{161}$$

Por definição, o valor médio da corrente no capacitor é igual a zero. O valor médio da corrente de entrada pode ser calculado pelo processo demonstrado nas equações (162) e (163).

$$\boldsymbol{\frac{d_0}{2}.\left(2.\left(I_{pv} - I_{Lmin}\right) + \Delta I_{lE1}\right) + (1 - d_0).I_{pv} = 0} \tag{162}$$

$$\boldsymbol{I_{pv} = d_0.(I_{Lmin} - \frac{\Delta I_{lE1}}{2})} \tag{163}$$

O valor eficaz da corrente é descrito pelas equações (164) até (166).

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}\left[I^2_{Cin}(t)\right] * dt} \tag{164}$$

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{1}{T}.\left(\int_{0}^{d0*Ts}\left[I_{pv} - I_l(t)\right]^2 dt + \int_{d0*Ts}^{Ts}\left[I_{pv}\right]^2 dt\right)} \tag{165}$$

$$\boldsymbol{I_{CinRMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3}.\left(3.\left[I_{pv} - I_{Lmin}\right]^2 + 3.\left[I_{pv} - I_{Lmin}\right] .\Delta I_{lE1} + \Delta I^2_{LE1}\right) + (1 - d_0).I^2_{pv}}} \tag{166}$$

2.3.7 Corrente no capacitor de saída

O valor eficaz da corrente é descrito pelas equações (167) até (169).

$$\boldsymbol{I^2_{Cinef} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}\left[I^2_{Cout}(t)\right].dt} \tag{167}$$

$$I_{CoutRMS}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d_0*T_s}[I_o]^2\right).dt + \left(\int_{d_0*T_s}^{d_2*T_s}[(I_L(t) + I_o)]^2\right) + \left(\int_{d_2*T_s}^{Ts}[\,(I_o)]^2\right)\right] \quad (168)$$

$$I_{CoutRMS}^2 = \sqrt{(d_0 + (1 - d_2)) * I_o^2 + + \frac{d_2 - d_0}{3} * \begin{pmatrix} 3 * [I_o - (I_{Lmin} + \Delta I_{lE3})] \\ +3 * [I_o - (I_{Lmin}^2 + \Delta I_{lE3})] * \Delta I_{lE2} + \Delta I_{LE2}^2 \end{pmatrix}} \quad (169)$$

2.3.8 Corrente na bateria

O valor médio da corrente na bateria é calculado pelas equações (170) e (171).

$$I_{batMed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d_2*T_s}^{Ts} I_l(t)dt \quad (170)$$

$$I_{batMed} = \frac{1 - d_2}{2}.[2.((I_{lmin})) + \Delta I_{lE3}\,) \quad (171)$$

O valor eficaz da corrente na bateria descrita pelas equações (172) até (174).

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{Ts}[I_{Bat}(t)]^2\,dt\right) \quad (172)$$

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_{d_2*T_s}^{Ts}[I_l(t)]^2\,dt\right) \quad (173)$$

$$I_{BatRMS} = \sqrt{\frac{1 - d_2}{3}.(3.[(I_{Lmin})]^2 + 3.[I_{Lmin}]^2.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2)} \quad (174)$$

2.3.9 Correntes nas chaves

O valor médio da corrente na chave S_0 é descrita pelas equações (175) e (176). Já o valor eficaz da corrente da chave S_0 é descrita pelas equações (177) e (178).

$$\mathbf{I_{S0Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S0}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{175}$$

$$\boldsymbol{I_{S0Med}} = \frac{\boldsymbol{d_0}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left((\boldsymbol{I_{lmin}})\right) + \Delta \boldsymbol{I_{lE1}}\right) \tag{176}$$

$$\mathbf{I_{S0Ef}}^{\mathbf{2}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} [\mathbf{I_{S0}(t)}]^{\mathbf{2}}\mathbf{dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} [\mathbf{I_l(t)}]^{\mathbf{2}}\mathbf{dt} \tag{177}$$

$$\boldsymbol{I_{S0RMS}} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}}.\Delta \boldsymbol{I_{lE1}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE1}^2}\right.} \tag{178}$$

O valor médio da corrente na chave S_2 é descrita pelas equações (179) e (180).

$$\mathbf{I_{S2Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S2}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\boldsymbol{d_0 * T_s}}^{\boldsymbol{d_2 * T_s}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{179}$$

$$\boldsymbol{I_{S2Med}} = \frac{\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}}{\mathbf{2}}.\left[\mathbf{2}.\left(\left(\boldsymbol{I_{lmin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right) + \Delta \boldsymbol{I_{lE1}}\right) \tag{180}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_2 descrita pelas equações (181) e (183).

$$\boldsymbol{I_{S2RMS}^2} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Ts}} [\boldsymbol{I_{S2}(t)}]^{\mathbf{2}}\, \boldsymbol{dt}\right) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}.\left(\int_{\boldsymbol{d_0 * T_s}}^{\boldsymbol{d_2 * T_s}} [\boldsymbol{I_l(t)}]^{\mathbf{2}}\, \boldsymbol{dt}\right) \tag{179}$$

$$\boldsymbol{I_{S2Ef}^2} = \frac{\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right]\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right].\Delta \boldsymbol{I_{lE2}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE2}^2}\right) \tag{180}$$

$$\boldsymbol{I_{S2Ef}} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right]\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta \boldsymbol{I_{lE3}}\right)\right].\Delta \boldsymbol{I_{lE2}} + \Delta \boldsymbol{I_{LE2}^2}\right)} \tag{181}$$

Os valores de corrente na chave S_3, tanto eficaz quanto médio, são iguais às da bateria, calculados nas equações (171) e (174).

Não há condução de corrente na chave S_1, logo tanto o valor eficaz da corrente quanto O valor médio da corrente são iguais a zero.

2.3.10 Correntes nos diodos

Os O valores de corrente no diodo D_0, tanto eficaz quanto média, são iguais as da chave S_0, descritas nas equações (176) e (178).

Os valores de corrente no diodo D_2 e D_3, tanto eficaz quanto médio, são iguais aos da bateria, calculados nas equações (171) e (173)

Os valores de corrente no diodo D_1 e D_4, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_2, calculados nas equações (180) e (183).

2.3.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo zero até o intervalo de tempo d_0*T_s até d_2*T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (184) e (185).

$$\int_{d_2*T_s}^{d_0*T_s} dV_{Cot} = \int_{d_2*T_s}^{d_0*T_s} \frac{I_{Cout}(t)}{C_{out}} . dt \tag{184}$$

$$\Delta V_{Cout} = \frac{V_{Out} . (d_2 - d_0)}{R . C_{out} . f} \tag{185}$$

2.3.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo d_0 até o intervalo de tempo Ts, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (186) e (187).

$$\int_{d_0*T_s}^{Ts} dV_{Cin} = \int_{d_0*T_s}^{Ts} \frac{V_{Cin}(t)}{C_{in}}.dt \tag{186}$$

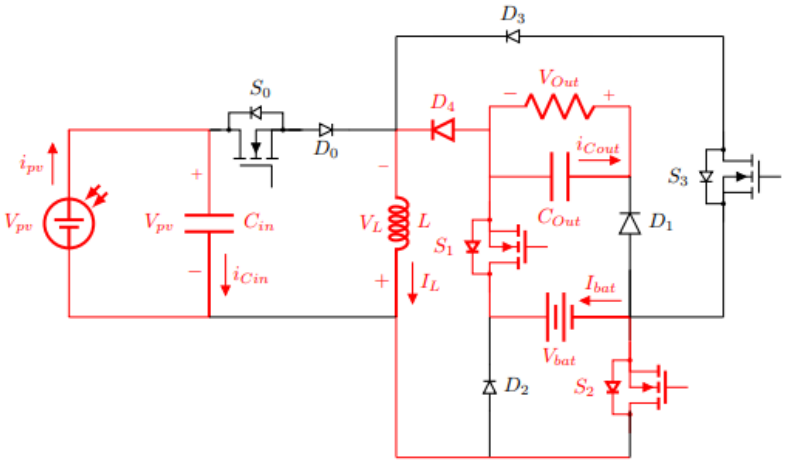
$$\Delta V_{Cin} = \frac{I_{pv}.(1-d_0)}{C_{in}.f} \tag{187}$$

2.4 Modo 3 – fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga

2.4.1 Etapas de operação

A análise do conversor operando no modo 3, ou seja, com o objetivo de carregar a carga com auxílio do painel solar e da bateria, é composta por três etapas de operação. A etapa 1 do modo 3 é igual a etapa 1 do modo 1, ver em 2.2.1. A etapa 2 está ilustrada na Figura 43.

Figura 43 – Etapa 2 da topologia proposta. Em vermelho, o fluxo de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Nessa etapa, há o momento de carregamento de energia do indutor pela bateria. As equações de estado da etapa 2 estão descritas pelas equações (188) até (191).

$$I_{Cin} = C_{in} * \frac{dV_{Cin}}{dt} = I_{pv} \tag{188}$$

$$\boldsymbol{I_{Cout} = C_{Out} * \frac{dV_{Cout}}{dt} = -\frac{V_{Cout}}{R_{Load}} = -\frac{V_{Out}}{R_{Load}}} \tag{189}$$

$$\boldsymbol{V_l = L * \frac{dI_l}{dt} = V_{Cin} = V_{bat}} \tag{190}$$

$$\boldsymbol{I_{bat} = -I_l} \tag{191}$$

Os esforços nas chaves estão descritos pelas equações (192) até (199).

$$V_{S0} = V_{pv}\ V \tag{192}$$

$$I_{S0} = 0\ A \tag{193}$$

$$V_{S1} = 0\ V \tag{194}$$

$$I_{S1} = I_l\ A \tag{195}$$

$$V_{S2} = 0\ V \tag{196}$$

$$I_{S2} = I_l A \tag{197}$$

$$V_{S3} = V_b\ V \tag{198}$$

$$I_{S3} = 0\ A \tag{199}$$

Os esforços nos diodos estão descritos pelas equações (200) até (209).

$$\boldsymbol{V_{D0} = V_{pv}\ V} \tag{200}$$

$$\boldsymbol{I_{D0} = 0\ A} \tag{201}$$

$$\boldsymbol{V_{D1} = V_{bat}\ V} \tag{202}$$

$$\boldsymbol{I_{D1} = 0\ A} \tag{203}$$

$$\boldsymbol{V_{D2} = V_{out}\ V} \tag{204}$$

$$\boldsymbol{I_{D2} = 0\ A} \tag{205}$$

$$\boldsymbol{V_{D3} = 0\ V} \tag{206}$$

$$\boldsymbol{I_{D3} = 0\ A} \tag{207}$$

$$\boldsymbol{V_{D4} = 0\ V} \tag{208}$$

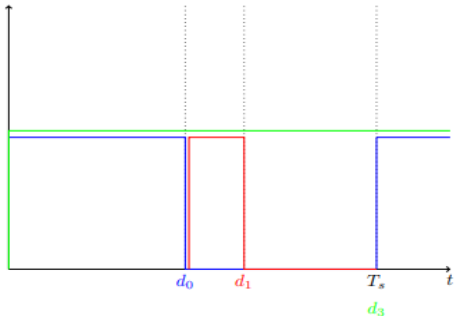
$$I_{D4} = I_l\, A \tag{209}$$

A etapa 3 do modo 3 é igual a etapa 2 do modo 1.

2.4.2 Formas de onda

As formas de onda dos acionamentos das chaves estão ilustradas na Figura 44.

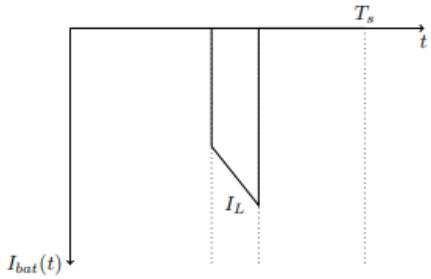
Figura 44 – Forma de onda do acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 45, a forma de onda teórica da corrente na bateria está ilustrada. É uma corrente pulsada, tendo o valor igual à da corrente no indutor entre d_1, razão cíclica da chave S_1, e d_2. É negativa pois a bateria está se descarregando, carregando o indutor.

Figura 45 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 3

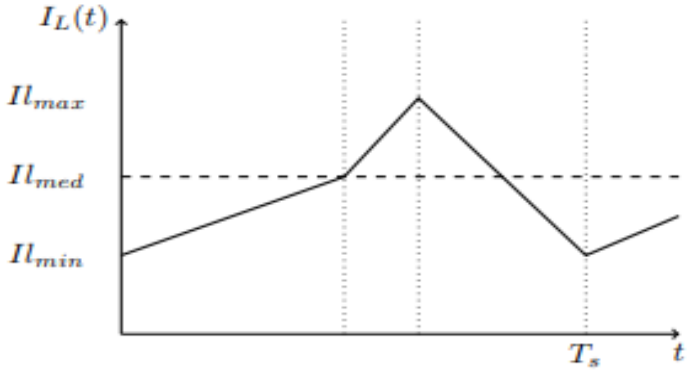


Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 46, a forma de onda teórica da corrente no indutor. Há uma variação da derivada após d_0 pois neste intervalo de tempo há dois períodos de carregamento, uma para a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, entre o intervalo de tempo

inicial do período d_0 e d_2, e depois para a soma da tensão de saída mais a tensão da bateria, entre d_0 e d_2.

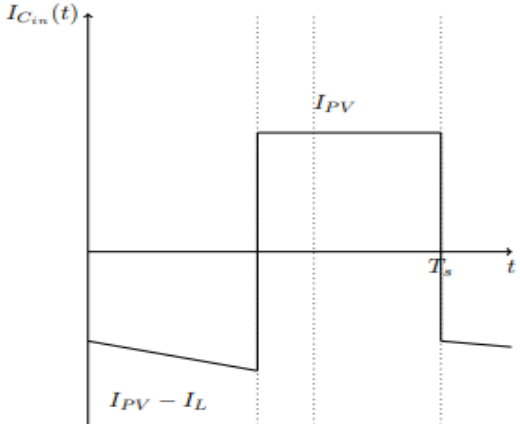
Figura 46 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 3



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de entrada está ilustrada na Figura 47. Inicialmente sendo a corrente no indutor menos a corrente de entrada, a corrente I_{pv}, pois é o período em que há o carregamento do indutor e a chave S_0 estiver acionada. Após a abertura da chave, somente fica com o valor da corrente de entrada.

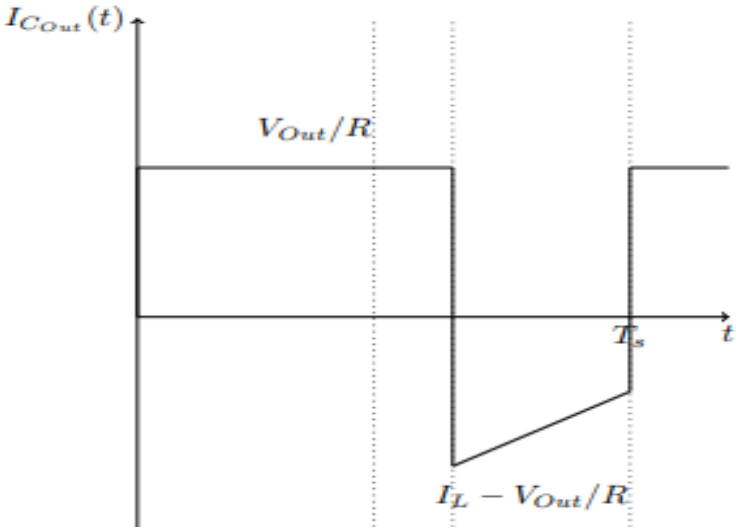
Figura 47 – Forma de onda da corrente no capacitor de entrada no modo 3



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de saída está ilustrada na Figura 48. Inicialmente sendo a corrente da carga, do início do período até d_1, e depois sendo o valor da corrente no indutor menos a corrente da carga, de d_1 até o fim do período, sendo neste intervalo de tempo o momento de carregamento do indutor.

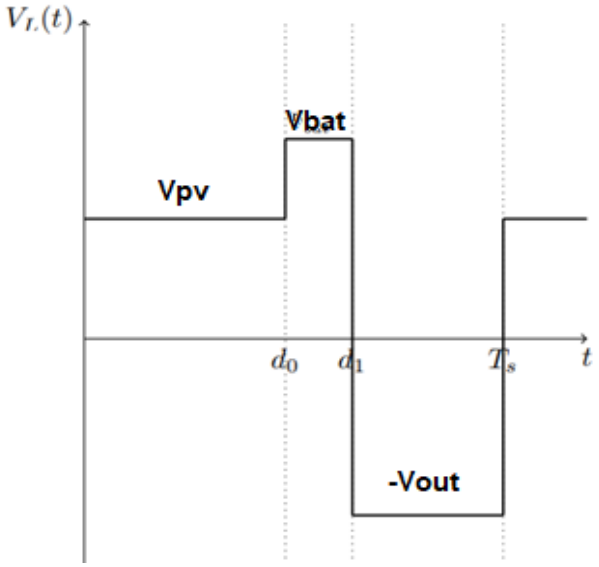
Figura 48 – Forma de onda da corrente no capacitor de saída no modo 3



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 49, representando as tensões que carregam o indutor, sendo positiva, e as tensões relacionadas a descarga do indutor, sendo negativas.

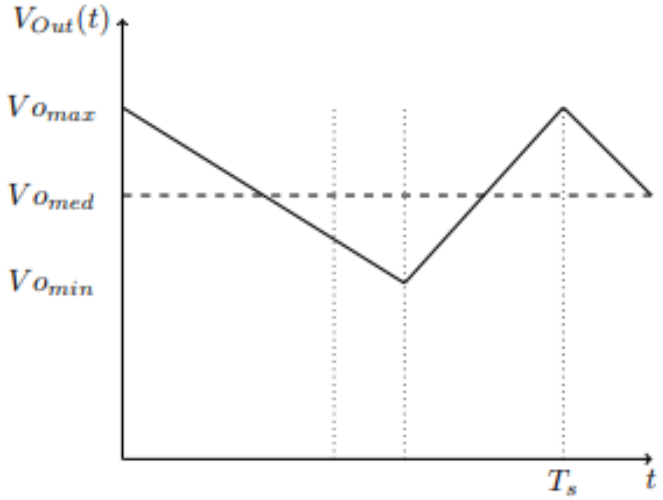
Figura 49 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 3.



Fonte: Produção do próprio autor.

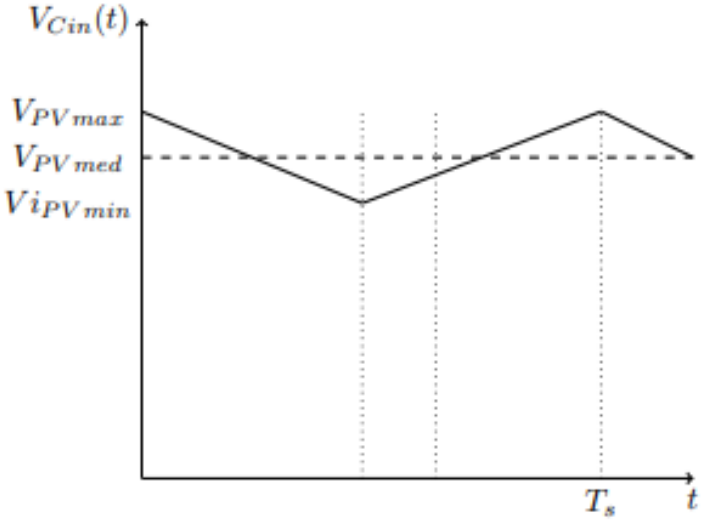
As Figuras 50 e 51 ilustram as formas de onda de tensão no capacitor de saída e entrada, com a representação de suas oscilações.

Figura 50 – Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 3



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 51 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 3



Fonte: Produção do próprio autor.

2.4.3 Ganho estático

Seja a forma de onda da forma de onda da tensão no indutor descrita pela Figura 61. A equação do valor médio no indutor é descrita pela equação (210).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} V_l.dt = \int_{0}^{d_0*T_s} V_{Cin}.dt + \int_{d_0*T_s}^{d1*T_s} V_{Bat}.dt + \int_{d1*T_s}^{T_s} -V_{out}.dt \qquad (210)$$

Como a tensão média do indutor é igual a zero, a solução é descrita pelas equações (211) até (213).

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_{0*}T_s}) - \boldsymbol{V_{Cout}}.(\boldsymbol{T_s} - \boldsymbol{d_{1*}T_s}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\boldsymbol{d_{1*}T_s} - \boldsymbol{d_{0*}T_s}) \tag{211}$$

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Cout}}.(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_1}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\boldsymbol{d_1} - \boldsymbol{d_0}) \tag{212}$$

$$\boldsymbol{V_{Cout}} = \frac{\boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\boldsymbol{d_1} - \boldsymbol{d_0})}{(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_1})} \tag{213}$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser calculado pela equação (214).

$$\boldsymbol{V_{Out}} = \frac{\boldsymbol{V_{PV}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Bat}}.(\boldsymbol{d_1} - \boldsymbol{d_0})}{(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_1})} \tag{214}$$

2.4.4 Ondulação da corrente no Indutor

Pela forma da onda da corrente no indutor, há uma variação de corrente em estado de condução. Assim, para a etapa 1, a ondulação de corrente pode ser determinada pelos passos mostrados da equação (215) e (216).

$$\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} \boldsymbol{dI_l} = \int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} \frac{\boldsymbol{V_l(t)}}{\boldsymbol{L}} \boldsymbol{dt} \tag{215}$$

$$\Delta \boldsymbol{I_{LE1}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}.\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{f}} \tag{216}$$

E assim, com o mesmo procedimento, as respectivas variações de corrente no indutor nas etapas 2 e 3 são descritas pelas equações (217) e (218), respectivamente.

$$\Delta I_{LE2} = \frac{V_{bat}.(d_1 - d_0).T_s}{L} = \frac{V_{bat}.(d_1 - d_0)}{L * f} \tag{217}$$

$$\Delta I_{LE3} = \frac{V_{Cout}.(1 - d_1).T_s}{L} = \frac{V_{Out}.(1 - d_1)}{L.f} \tag{218}$$

2.4.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor pode ser obtida a partir do valor médio da corrente no capacitor de saída, como descrita pelas equações (219) até (221).

$$\frac{1}{T}\int_0^{T_s} I_{Cout}.dt = \int_0^{d_1 * T_s} I_{Out}.dt + \int_{d_1 * T_s}^{T_s} -I_l(t) + I_{Out} \ .dt \tag{219}$$

$$0 = I_{Out}.T_s + \int_{d1*Ts}^{Ts} -I_l(t).dt \tag{220}$$

$$I_{Lmin} = \frac{I_o}{(1 - d_1)} - \Delta I_{lE3}.0,5 \tag{221}$$

Deste modo, o valor médio da corrente no indutor é calculado pelas equações (222).

$$I_{Lmed} = I_{LMin} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{222}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é descrita pelo pela equação (223) até (228).

$$I_{LRMS}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} [I_l \ (t)].dt \tag{223}$$

$$\begin{aligned} I_{LRMS}^2 = \frac{1}{T_s} * \Bigg[& \left(\int_0^{d0*Ts} \left[I_{Lmin} + \frac{V_{pv}}{L}.t \right]^2 \right).dt \\ & + \left(\int_{d0*Ts}^{d1*Ts} \left[(I_{Lmin} + \Delta I_{lE1}) + \frac{V_{bat}}{L}.t \right]^2 \right).dt \\ & + \left(\int_{d1*Ts}^{Ts} \left[(I_{Lmin} + \Delta I_{lE2}) - \frac{(V_{out})}{L}.t \right]^2 \right).dt \Bigg] \end{aligned} \tag{224}$$

$$\boldsymbol{I_{Lef}} = \sqrt{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{c}} \tag{225}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}}.\Delta\boldsymbol{I_{lE1}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE1}^2}) \tag{226}$$

$$\boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{d_2} - \boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta\boldsymbol{I_{lE3}}\right) + \boldsymbol{3}.\left(\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \Delta\boldsymbol{I_{lE3}}\right).\Delta\boldsymbol{I_{lE2}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE2}^2}) \tag{227}$$

$$\boldsymbol{c} = \frac{\boldsymbol{1} - \boldsymbol{d_2}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}^2} + \boldsymbol{3}.\boldsymbol{I_{Lmin}}.\Delta\boldsymbol{I_{lE3}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE3}^2}) \tag{228}$$

2.4.6 Corrente no capacitor de entrada

O valor médio da corrente é calculado pela equação (229).

$$\boldsymbol{I_{Cinmed}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T}}.\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{Ts}}\left[\boldsymbol{I_{Cin}}\right].\boldsymbol{dt} \tag{229}$$

Por definição, o valor médio da corrente no capacitor é igual a zero, como calculado na equação (39). O valor médio da corrente de entrada pode ser calculado pelo processo demonstrado nas equações (230) até (232).

$$\boldsymbol{0} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T}}.\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{Ts}}\left[\boldsymbol{I_{Cin}}\right] * \boldsymbol{dt} \tag{230}$$

$$\frac{\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{2}}.\left(\boldsymbol{2}.\left(\boldsymbol{I_{pv}} - \boldsymbol{I_{Lmin}}\right) + \Delta\boldsymbol{I_{lE1}}\right) + (\boldsymbol{1} - \boldsymbol{d_0}).\boldsymbol{I_{pv}} = \boldsymbol{0} \tag{231}$$

$$\boldsymbol{I_{pv}} = \boldsymbol{d_0}.(\boldsymbol{I_{Lmin}} - \frac{\Delta\boldsymbol{I_{lE1}}}{\boldsymbol{2}}) \tag{232}$$

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (233) até (235).

$$\boldsymbol{I_{Cinef}^2} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T}}.\int_{\boldsymbol{0}}^{\boldsymbol{Ts}}\left[\boldsymbol{I_{Cin}^2}(\boldsymbol{t})\right] * \boldsymbol{dt} \tag{233}$$

$$I_{CinRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{d0*Ts} [I_{pv} - I_l(t)]^2\, dt + \int_{d0*Ts}^{Ts} [I_{pv}]^2\, dt\right) \tag{234}$$

$$I_{CinRMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3}.\left(3.\left[I_{pv} - I_{Lmin}\right]^2 + 3.\left[I_{pv} - I_{Lmin}\right] .\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2\right) + (1 - d_0).I_{pv}^2} \tag{235}$$

2.4.7 Corrente no capacitor de saída

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (236) até (238).

$$I_{Couef}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} \left[I_{Cout}^2(t)\right].dt \tag{236}$$

$$I_{CoutRMS}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d_1*Ts} [I_o]^2\right).dt + \left(\int_{d1*Ts}^{Ts} [(-I_L(t) + I_o)]^2\right).dt\right] \tag{237}$$

$$I_{CoutRMS}^2 = (d_1).I_o^2 + \frac{1 - d_1}{3}.\left(3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}^2\right)\right].\Delta I_{lE2} + \Delta I_{LE3}^2\right) \tag{238}$$

2.4.8 Corrente na bateria

O valor médio da corrente na bateria é calculado pelas equações (239) e (240).

$$I_{batMed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d0Ts}^{d1Ts} -I_l(t)dt \tag{239}$$

$$I_{batMed} = \frac{d_1 - d_0}{2}.\left[2.\left((I_{lmin} + \Delta I_{lE1})\right) + \Delta I_{lE2}\right) \tag{240}$$

O valor eficaz da corrente na bateria descrita pelas equações (241) e (242).

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{Ts} [I_{Bat}(t)]^2\, dt\right) = \frac{1}{T}.\left(\int_{d_0*Ts}^{d_1*Ts} [-I_l(t)]^2\, dt\right) \tag{241}$$

$$I_{BatRMS} = \sqrt{\frac{1-d_2}{3}.(3.[I_{lmin}+\Delta I_{lE1}]^2 + 3.[I_{lmin}+\Delta I_{lE1}]^2.\Delta I_{lE3}+\Delta I_{LE3}^2)} \quad (242)$$

2.4.9 Correntes nas chaves

O valor médio da corrente na chave S_0 é descrita pelas equações (243) e (244).

$$\mathbf{I_{S0Med}} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{S0}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_0^{d_0*Ts} I_l(t)dt \quad (243)$$

$$I_{S0Med} = \frac{d_0}{2}.[2*((I_{lmin})) + \Delta I_{lE1}) \quad (244)$$

O valor eficaz da corrente na chave S_0 descrita pelas equações (245) e (246).

$$\mathbf{I_{S0RMS}}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} [I_{S0}(t)]^2 dt = \frac{1}{T}.\int_0^{d_0*Ts} [I_l(t)]^2 dt \quad (245)$$

$$I_{S0RMS}^2 = \sqrt{\frac{d_0}{3}.(3.[(I_{Lmin})]^2 + 3.[(I_{Lmin})]^2.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2} \quad (246)$$

As Correntes média e eficaz na chave S_1 são iguais as correntes da bateria descritas pelas equações (243) e (245).

O valor médio da corrente na chave S_2 é descrita pelas equações (247) e (248).

$$\mathbf{I_{S2Med}} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{S0}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d_0*Ts}^{Ts} I_l(t)dt \quad (247)$$

$$I_{S2Med} = \frac{d_1-d_0}{2}.[2.((I_{lmin}+\Delta I_{lE1})) + \Delta I_{lE2}) + \frac{1-d_1}{2}.[2.((I_{lmin})) + \Delta I_{lE3}) \quad (248)$$

O valor eficaz da corrente na chave S_2 descrita pelas equações (249) e (250).

$$\mathbf{I_{S2Ef}}^2 = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}}[\mathbf{I_{S0}(t)}]^2\mathbf{dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\boldsymbol{d_0*Ts}}^{\mathbf{Ts}}[\mathbf{I_l(t)}]^2\mathbf{dt} \tag{249}$$

$$\boldsymbol{I_{S2ef}} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{d_1}-\boldsymbol{d_0}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[[(\boldsymbol{I_{lmin}}+\Delta\boldsymbol{I_{lE1}})]\right]^2+\mathbf{3}.[(\boldsymbol{I_{lmin}}+\Delta\boldsymbol{I_{lE1}})].\Delta\boldsymbol{I_{lE2}}+\Delta\boldsymbol{I_{LE2}^2}\right) + \frac{\mathbf{1}-\boldsymbol{d_1}}{\mathbf{3}}.\left(\mathbf{3}.\left[[(\boldsymbol{I_{Lmin}})]\right]^2+\mathbf{3}.[(\boldsymbol{I_{Lmin}^2})].\Delta\boldsymbol{I_{lE3}}+\Delta\boldsymbol{I_{LE3}^2}\right)} \tag{250}$$

Não há condução de corrente na chave S_3, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

2.4.10 Correntes nos diodos

Os valores de corrente no diodo D_0, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_0. Assim, seus valores são calculados pelas equações (247) e (249).

Não há condução de corrente no diodo D_2, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

O valor médio da corrente no Diodo D_1 é descrita pelas equações (251) e (252).

$$\mathbf{I_{D1Med}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}}\mathbf{I_{S0}(t)dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\boldsymbol{d_1*Ts}}^{\mathbf{Ts}}\mathbf{I_l(t)dt} \tag{251}$$

$$\boldsymbol{I_{D1Med}} = \frac{\mathbf{1}-\boldsymbol{d_1}}{\mathbf{2}}.[\mathbf{2}.((\boldsymbol{I_{lmin}}))+\Delta\boldsymbol{I_{lE3}}\,) \tag{252}$$

O valor eficaz da corrente no Diodo D_1 descrita pelas equações (253) e (254).

$$\mathbf{I_{D1Ef}}^2 = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{Ts}}[\mathbf{I_{S0}(t)}]^2\mathbf{dt} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}.\int_{\boldsymbol{d_1*Ts}}^{\mathbf{Ts}}[\mathbf{I_l(t)}]^2\mathbf{dt} \tag{253}$$

$$I_{D1ef} = \sqrt{\frac{1-d_1}{3}.\left(3.\left[\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]\right]^2 + 3.\left[\left(I_{Lmin}^2\right)\right].\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2\right)} \quad (254)$$

Os valores de corrente no diodo D_4, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_2. Assim, seus valores são calculados pelas equações (251) e (253).

Não há condução de corrente no diodo D_3, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

2.4.11 Ondulação da tensão no capacitor de saída

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo zero até o intervalo de tempo D_0*T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (255) e (256).

$$\int_0^{d_0*T_s} dV_{Cot} = \int_0^{d_0.T_s} \frac{V_{Cout}(t)}{C_{out}}.dt \quad (255)$$

$$\Delta V_{Cout} = \frac{V_{Out}.(d_1)}{R.C_{out}.f} \quad (256)$$

2.4.12 Ondulação da tensão no capacitor de entrada

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo d0 até o intervalo de tempo T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (257) e (258).

$$\int_{d0*Ts}^{Ts} dV_{Cin} = \int_{d0*Ts}^{Ts} \frac{V_{Cin}(t)}{C_{in}}.dt \quad (257)$$

$$\Delta V_{Cin} = \frac{I_{pv}.(1 - d_0)}{C_{in}.f} \tag{258}$$

2.5 Modo 4 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga

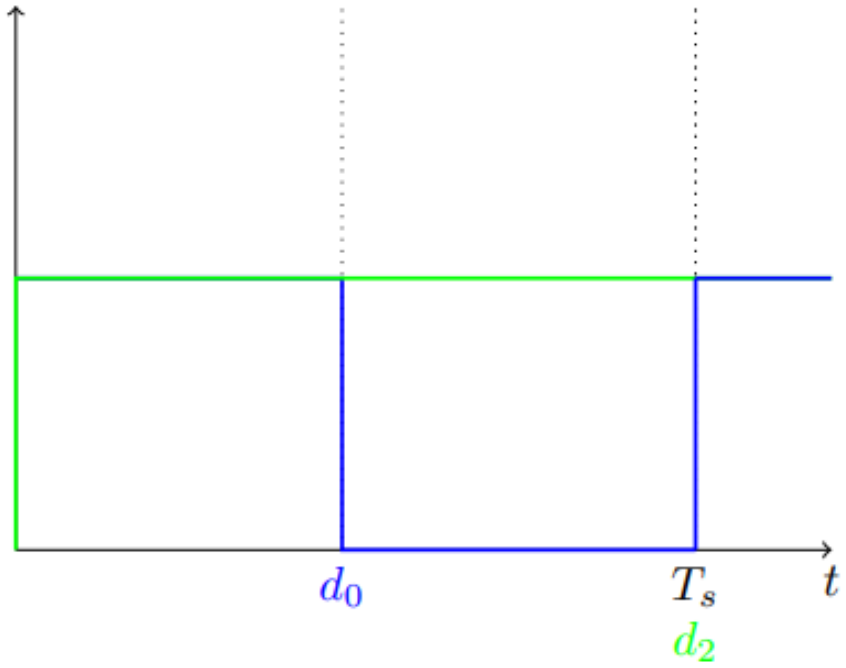
2.5.1 Etapas de operação

A análise do conversor operando com o painel sendo a única fonte de potência para a carga é feita a partir de duas etapas derivadas do modo 1. A etapa 1 do modo 4 é igual a etapa 1 do modo 1, ver em 2.2.1. A etapa 2 do modo 4 é igual a etapa 2 do modo 1, ver em 2.2.1.

2.5.2 Formas de onda

As formas de onda dos acionamentos das chaves estão ilustradas na Figura 52.

Figura 52 – Forma de onda do acionamento das chaves

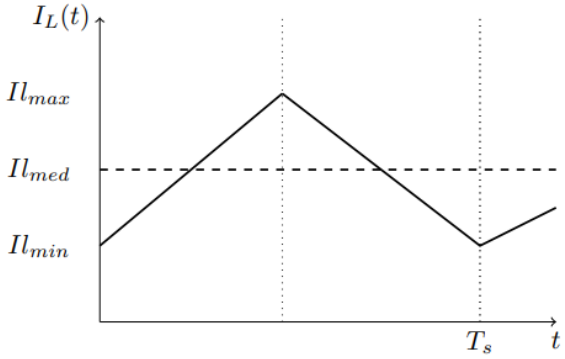


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 53, a forma de onda teórica da corrente no indutor. No primeiro momento, há o carregamento do indutor, feito pelo painel fotovoltaico, indicado pelo intervalo de

tempo em que a corrente no indutor está com inclinação positiva. Após este momento, ocorre o descarregamento no indutor, indicado pelo momento em que a corrente no indutor está com inclinação negativa.

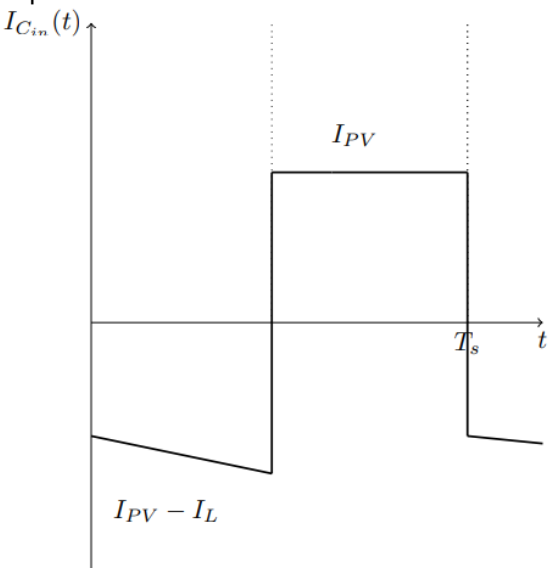
Figura 53 – Forma da onda da corrente no indutor no modo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de entrada está ilustrada na Figura 54. Inicialmente sendo a corrente no indutor menos a corrente de entrada, a corrente I_{pv}, pois é o período em que há o carregamento do indutor e a chave S_0 estiver acionada

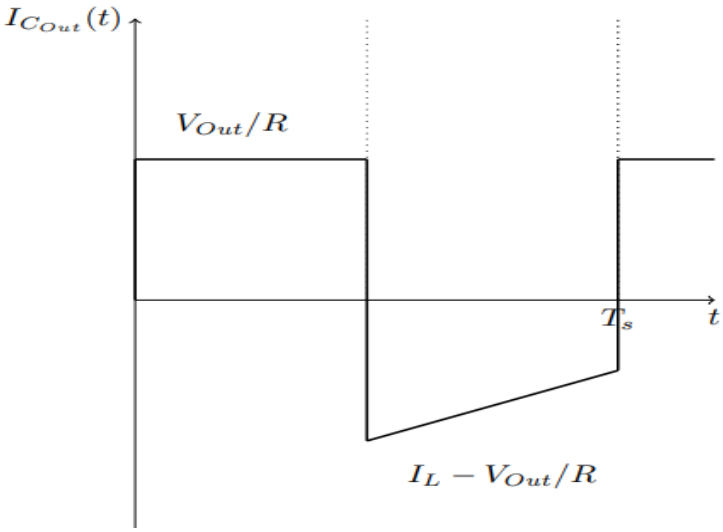
Figura 54 – Forma de onda da corrente do capacitor de entrada no modo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda teórica da corrente no capacitor de saída está ilustrada na Figura 55. Inicialmente sendo a corrente da carga, do início do período até d_0, e depois sendo o valor da corrente no indutor menos a corrente da carga, de d_0 até o fim do período, sendo neste intervalo de tempo o momento de carregamento do indutor.

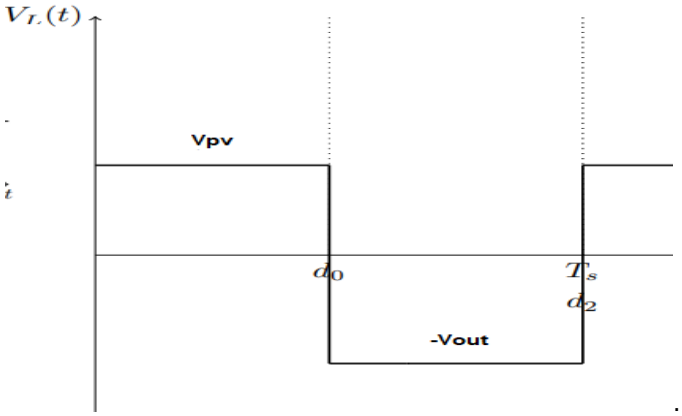
Figura 55 – Forma de onda da corrente do capacitor de saída no modo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

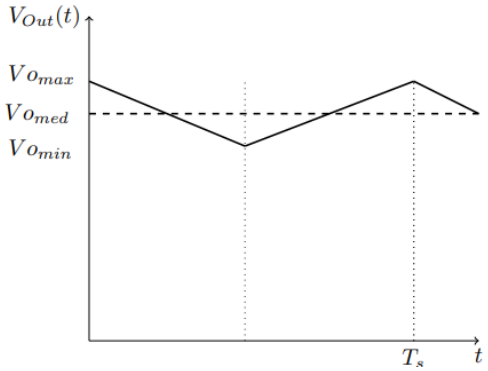
A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 56, representando as tensões que carregam o indutor, sendo positiva, e as tensões relacionadas a descarga do indutor, sendo negativas. As Figuras 57 e 58 ilustram as formas de onda de tensão no capacitor de saída e entrada, com a representação de suas oscilações.

Figura 56 – Forma de onda da tensão no indutor no modo 4



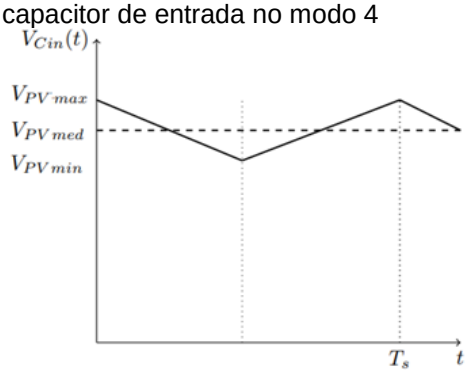
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 57 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 – Forma de onda da tensão no capacitor de entrada no modo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

2.5.3 Ganho estático

Seja a forma de onda da forma de onda da tensão no indutor ilustrada pela Figura 74. A equação do valor médio no indutor é descrita pelas equações (259).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} V_l.dt = \int_{0}^{d_0*T_s} V_{Cin}.dt + \int_{d_0*T_s}^{T_s} -V_{Out}.dt \tag{259}$$

Como a tensão média do indutor são iguais a zero, a solução é descrita pelas equações (260) até (262).

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_{0*}T_s}) - \boldsymbol{V_{Cout}}.(\boldsymbol{T_s} - \boldsymbol{d_{0*}T_s}) \tag{260}$$

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0}) - \boldsymbol{V_{Cout}}.(\mathbf{1} - \boldsymbol{d_0}) \tag{261}$$

$$\boldsymbol{V_{Cout}} = \frac{\boldsymbol{V_{Cin}}.(\boldsymbol{d_0})}{(\mathbf{1}-\boldsymbol{d_0})} \tag{262}$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser calculado pela equação (263).

$$\boldsymbol{V_{Out}} = \frac{\boldsymbol{V_{Pv}}.(\boldsymbol{d_0})}{(\mathbf{1}-\boldsymbol{d_0})} \tag{263}$$

2.5.4 Ondulação da corrente no indutor

Pela forma da onda da corrente no indutor, há uma variação de corrente em estado de condução. Assim, a ondulação deste modo pode ser determinada pelos passos mostrados da equação (264) e (265).

$$\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0*T_s}} \boldsymbol{dI_l} = \int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0*T_s}} \frac{\boldsymbol{V_l(t)}}{\boldsymbol{L}}.\boldsymbol{dt} \tag{264}$$

$$\Delta\boldsymbol{I_{LE1}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}.\boldsymbol{T_s}}{\boldsymbol{L}} = \frac{\boldsymbol{V_{pv}}.\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{f}} \tag{265}$$

2.5.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor pode ser obtida a partir do valor médio da corrente no capacitor de saída, como descrita pelas equações (266) até (268).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} I_{Cout}.dt = \int_{0}^{d_0*T_s} I_{Out}.dt + \int_{d_0*T_s}^{T_s} -I_l(t) + I_{Out} \ .dt \tag{266}$$

$$0 = I_{Out}.T_s + \int_{d_0*T_s}^{Ts} -I_l(t).dt \tag{267}$$

$$I_{Lmin} = \frac{I_o}{(1-d_0)} - \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{268}$$

Deste modo, o valor médio da corrente no indutor é calculado pela equação (269).

$$I_{Lmed} = I_{LMin} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{269}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é calculado pela equação (270) até (274).

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts} [I_l \ (t)].dt \tag{270}$$

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\begin{array}{l}\left(\int_{0}^{d_0*T_s}\left[I_{Lmin} + \frac{V_{pv}}{L}.t\right]^2\right).dt \\ +\left(\int_{d_0*T_s}^{Ts}\left[(I_{Lmin}) - \frac{(V_{out})}{L}.t\right]^2\right)\end{array}\right] \tag{271}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{a + c} \tag{272}$$

$$a = \frac{d_0}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \tag{273}$$

$$c = \frac{1-d_0}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2) \tag{274}$$

2.5.6 Corrente no capacitor de entrada

O valor médio da corrente é calculado pela equação (275).

$$\boldsymbol{I_{Cinmed} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}[I_{Cin}].dt} \tag{275}$$

O valor médio da corrente de entrada pode ser calculado pelo processo demonstrado nas equações (276) até (278).

$$\boldsymbol{0 = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}[I_{Cin}].dt} \tag{276}$$

$$\boldsymbol{\frac{d_0}{2}.\left(2.\left(I_{pv} - I_{Lmin}\right) + \Delta I_{lE1}\right) + (1 - d_0).I_{pv} = 0} \tag{277}$$

$$\boldsymbol{I_{pv} = d_0.(I_{Lmin} - \frac{\Delta I_{lE1}}{2})} \tag{278}$$

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (279) até (282).

$$\boldsymbol{I^2_{Cinef} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}[I^2_{Cin}(t)].dt} \tag{279}$$

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{1}{T}.\left(\int_{0}^{d0*Ts}[I_{pv} - I_l(t)]^2\,dt + \int_{d0*Ts}^{Ts}[I_{pv}]^2\,dt\right)} \tag{280}$$

$$\boldsymbol{I^2_{CinRMS} = \frac{d_0}{3}.\left(3.[I_{pv} - I_{Lmin}]^2 + 3.[I_{pv} - I_{Lmin}] \;*\Delta I_{lE1} + \Delta I^2_{LE1}\right) + (1 - d_0).I^2_{pv}} \tag{281}$$

$$\boldsymbol{I_{CinRMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3}.\left(3.[I_{pv} - I_{Lmin}]^2 + 3.[I_{pv} - I_{Lmin}] \;.\Delta I_{lE1} + \Delta I^2_{LE1}\right) + (1 - d_0).I^2_{pv}}} \tag{282}$$

2.5.7 Corrente no capacitor de saída

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (283) e (284).

$$I_{CoutRMS}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}\left[I_{Cout}^2(t)\right].dt \tag{283}$$

$$I_{CoutRMS} = \sqrt{\begin{array}{c}(d_0).I_o^2 \\ + \frac{1-d_0}{3}.\left(3.\left[I_o - \left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.\left[I_o - (I_{Lmin}^2)\right].\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2\right)\end{array}} \tag{284}$$

2.5.8 Correntes nas chaves

O valor médio da corrente na chave S_0 é descrita pelas equações (285) e (286).

$$\mathbf{I_{S0Med}} = \frac{1}{\mathbf{T}} * \int_0^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S0}(t)dt} = \frac{1}{\mathbf{T}} * \int_0^{d_0 * T_s} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{285}$$

$$I_{S0Med} = \frac{d_0}{2} * \left[2 * \left((I_{lmin})\right) + \Delta I_{lE1}\right) \tag{286}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_0 descrita pelas equações (287) e (288).

$$\mathbf{I_{S0Ef}}^2 = \frac{1}{\mathbf{T}} * \int_0^{\mathbf{Ts}} \left[\mathbf{I_{S0}(t)}\right]^2 \mathbf{dt} = \frac{1}{\mathbf{T}} * \int_0^{d_0 * T_s} \left[\mathbf{I_l(t)}\right]^2 \mathbf{dt} \tag{287}$$

$$I_{S0RMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3}.(3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2} \tag{288}$$

O valor médio da corrente na chave S_2 é descrita pelas equações (289) e (290).

$$\mathbf{I_{S2Med}} = \frac{1}{\mathbf{T}}.\int_0^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_{S0}(t)dt} = \frac{1}{\mathbf{T}}.\int_{d_0 * T_s}^{\mathbf{Ts}} \mathbf{I_l(t)dt} \tag{289}$$

$$I_{S2Med} = \frac{1-d_0}{2}.\left[2.\left((I_{lmin})\right) + \Delta I_{lE1}\right) \tag{290}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_2 descrita pelas equações (291) e (292).

$$\mathbf{I_{S2RMS}}^2 = \frac{1}{\mathbf{T}}.\int_0^{\mathbf{Ts}} \left[\mathbf{I_{S2}(t)}\right]^2 \mathbf{dt} = \frac{1}{\mathbf{T}}.\int_{d_0 * T_s}^{\mathbf{Ts}} \left[\mathbf{I_l(t)}\right]^2 \mathbf{dt} \tag{291}$$

$$\boldsymbol{I_{S2RMS}} = \sqrt{\frac{\mathbf{1} - \boldsymbol{d_0}}{\mathbf{3}}.(\mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}} + \mathbf{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]^{\mathbf{2}}.\Delta\boldsymbol{I_{lE1}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE1}^{2}}} \tag{292}$$

Não há condução de corrente nas chaves S_1 e S_3, logo tanto o valor eficaz e médio da corrente são iguais a zero.

2.5.9 Correntes nos diodos

Os valores de corrente no diodo D_0, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_0, descritas pelas equações (287) e (288).

Os valores de corrente no diodo D_1 e D_4, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_2, descritas pelas equações (291) e (293).

Não há condução de corrente no diodo D_2, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

Não há condução de corrente no diodo D_3, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero.

2.5.10 Ondulação da tensão no capacitor de saída

Pela forma da onda da tensão no capacitor de saída, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do instante zero até o intervalo de tempo d_0*T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (293) e (294).

$$\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} \boldsymbol{dV_{Cot}} = \int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{d_0 * T_s}} \frac{\boldsymbol{V_{Cout}(t)}}{\boldsymbol{C_{out}}}.\boldsymbol{dt} \tag{293}$$

$$\Delta\boldsymbol{V_{Cout}} = \frac{\boldsymbol{V_{Out}}.(\boldsymbol{d_0})}{\boldsymbol{R}.\boldsymbol{C_{out}}.\boldsymbol{f}} \tag{294}$$

2.5.11 Ondulação da tensão no capacitor de entrada

Pela forma da onda da tensão no capacitor de entrada, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo d_0 até o intervalo de tempo T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (295) e (296).

$$\int_{d_0 * T_s}^{Ts} dV_{Cin} = \int_{d_0 * T_s}^{Ts} \frac{V_{Cin}(t)}{C_{in}} . dt \tag{295}$$

$$\Delta V_{Cin} = \frac{V_{Out} . (d_0)}{R . C_{out} . f} \tag{296}$$

2.6 Modo 5 – fluxo de potência do painel fotovoltaico para a bateria

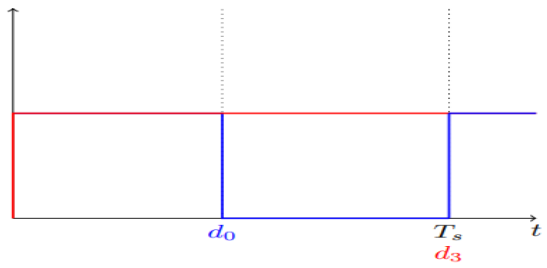
2.6.1 Etapas de operação

Neste modo, toda a energia da placa será usada somente para carregar a bateria. O Conversor opera neste modo com duas etapas. A etapa 1 do modo 4 é igual a etapa 1 do modo 1, ver em 2.2.1. A etapa 2 do modo 4 é igual a etapa 3 do modo 2, ver em 2.3.1.

2.6.2 Formas de onda

As formas de onda dos acionamentos das chaves estão ilustradas na Figura 59.

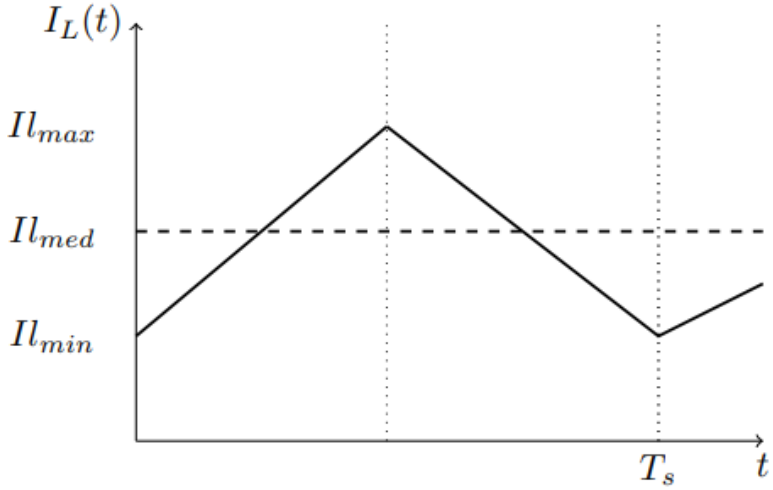
Figura 59 – Forma de onda do acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 60, a forma de onda teórica da corrente no indutor. No primeiro momento, há o carregamento do indutor, feito pelo painel fotovoltaico, do início do período até d_0 e o intervalo de tempo de descarregamento, de d_0 até o fim do período.

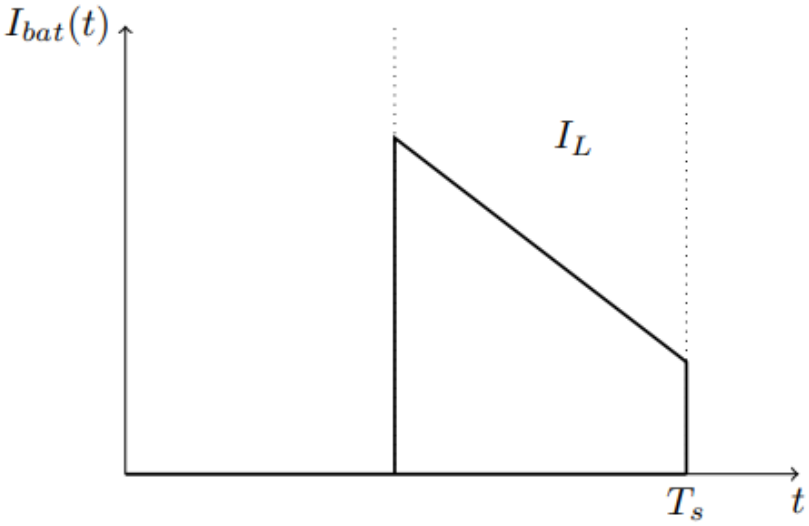
Figura 60 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 5



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 61, a forma de onda teórica da corrente na bateria está ilustrada. É uma corrente pulsada, tendo o valor igual à da corrente no indutor entre d_2 e T_s. E é positiva pois a bateria está sendo carregada.

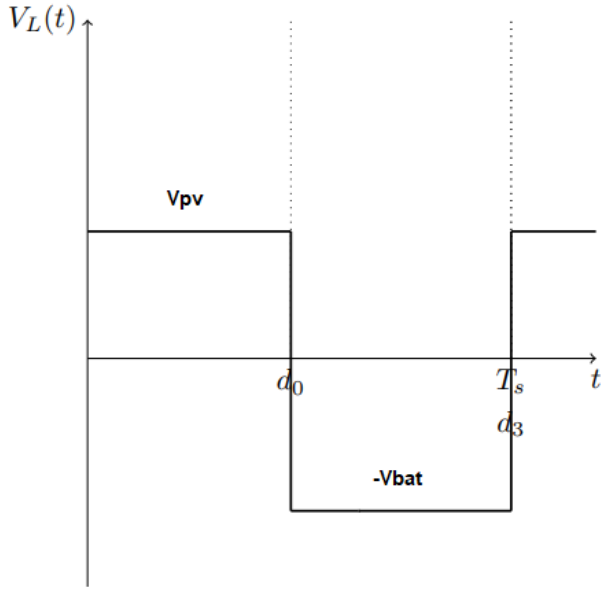
Figura 61 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 5



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 62, representando as tensões que carregam e descarregam o indutor.

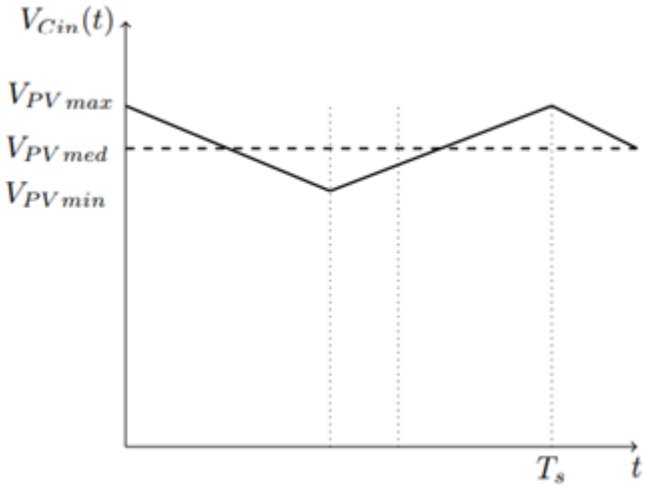
Figura 62 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 5



Fonte: Produção do próprio autor.

As Figura 63 ilustra a forma de tensão no capacitor de entrada, com a representação de sua oscilação

Figura 63 – Forma de onda da tensão no capacitor de entrada no modo 5



Fonte: Produção do próprio autor.

2.6.3 Ganho estático

Seja a forma de onda da forma de onda da tensão no indutor ilustrada pela Figura 86. A equação do valor médio no indutor é descrita pelas equações (297).

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T_s} V_l.dt = \int_{0}^{d_0*T_s} V_{Cin}.dt \int_{d_0*T_s}^{T_s} - V_{Bat}.dt \tag{297}$$

Como a tensão média do indutor é igual a zero, a solução é descrita pelas equações (298) até (300).

$$0 = V_{Cin}.(d_{0*}T_s) - V_{bat}.(T_s - d_{0*}T_s) \tag{298}$$

$$0 = V_{Cin}.(d_0) - V_{bat}.(1 - d_0) \tag{299}$$

$$V_{Bat} = \frac{V_{Cin}.(d_0)}{(1-d_0)} \tag{300}$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser calculado pela equação (301).

$$V_{Bat} = \frac{V_{Pv}.(d_0)}{(1-d_0)} \tag{301}$$

2.6.4 Ondulação da corrente no indutor

Pela forma da onda da corrente no indutor, há uma variação de corrente em estado de condução. Deste modo, a ondulação de corrente pode ser determinada pelos passos mostrados da equação (302) e (303).

$$\int_{0}^{d_0*T_s} dI_l = \int_{0}^{d_0*T_s} \frac{V_l(t)}{L}.dt \tag{302}$$

$$\Delta I_{LE1} = \frac{V_{pv}.d_0.T_s}{L} = \frac{V_{pv}.d_0}{L.f} \tag{303}$$

2.6.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor pode ser obtida a partir do valor médio na corrente no capacitor de entrada. O valor médio da corrente é calculado pelas equações (304) até (308).

$$I_{Cinmed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}[I_{Cin}].dt \tag{304}$$

$$0 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}[I_{Cin}].dt \tag{305}$$

$$\frac{d_0}{2}.(2.(I_{pv} - I_{Lmin}) + \Delta I_{lE1}) + (1 - d_0).I_{pv} = 0 \tag{306}$$

$$I_{pv} = d_0.(I_{Lmin} - \frac{\Delta I_{lE1}}{2}) \tag{307}$$

$$I_{Lmin} = \frac{I_{pv}}{d_0} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{308}$$

Deste modo, O valor médio da corrente no indutor é calculado pela equação (309).

$$I_{Lmed} = I_{LMin} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{309}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é descrita pela equação (310) até (313).

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T}*.\int_0^{Ts}[I_l\ (t)].dt \tag{310}$$

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d_0*Ts}\left[I_{Lmin} + \frac{V_{pv}}{L}.t\right]^2\right).dt + \left(\int_{d_0*Ts}^{Ts}\left[(I_{Lmin}) - \frac{(V_{bat})}{L}.t\right]^2\right)dt\right] \tag{311}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{a + c} \tag{312}$$

$$a = \frac{d_0}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \tag{313}$$

$$c = \frac{1 - d_0}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \tag{314}$$

2.6.6 Corrente no capacitor de entrada

O valor médio da corrente é calculado pela equação (315).

$$I_{Cinmed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}[I_{Cin}].dt \tag{315}$$

Por definição, o valor médio da corrente no capacitor é igual a zero, como calculado na equação (316). O valor médio da corrente de entrada pode ser calculado pelas equações (317) e (318).

$$0 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}[I_{Cin}].dt \tag{316}$$

$$\frac{d_0}{2}.\left(2.\left(I_{pv} - I_{Lmin}\right) + \Delta I_{lE1}\right) + (1 - d_0).I_{pv} = 0 \tag{317}$$

$$I_{pv} = d_0.(I_{Lmin} - \frac{\Delta I_{lE1}}{2}) \tag{318}$$

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (319) até (321).

$$I_{Cinef}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}[I_{Cin}^2(t)].dt \tag{319}$$

$$I_{CinRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{d_0*T_s}[I_{pv} - I_l(t)]^2\,dt + \int_{d_0*T_s}^{T_s}[I_{pv}]^2\,dt\right) \tag{320}$$

$$I_{CinRMS} = \sqrt{\frac{d_0}{3}.\left(3.[I_{pv} - I_{Lmin}]^2 + 3.[I_{pv} - I_{Lmin}] \quad * \Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2\right) + (1 - d_0).I_{pv}^2} \tag{321}$$

2.6.7 Corrente na bateria

O valor médio da corrente na bateria é calculado pelas equações (322) e (323).

$$\boldsymbol{I_{batMed} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d_0*T_s}^{Ts} I_l(t)dt} \tag{322}$$

$$\boldsymbol{I_{BatMed} = \frac{1-d_0}{2}.[2.((I_{lmin})) + \Delta I_{lE1}\ )} \tag{323}$$

O valor eficaz da corrente na bateria descrita pelas equações (324) e (325).

$$\boldsymbol{I^2_{BatRMS} = \frac{1}{T}.\left(\int_{0}^{Ts}[I_{Bat}(t)]^2\ dt\right) = \frac{1}{T}.\left(\int_{d_0*T_s}^{Ts}[I_l(t)]^2\ dt\right)} \tag{324}$$

$$\boldsymbol{I^2_{BatRMS} = \sqrt{\frac{1-d_0}{3}.(3.[(I_{Lmin})]^2 + 3.[(I_{Lmin})]^2.\Delta I_{lE1} + \Delta I^2_{LE1}}} \tag{325}$$

2.6.8 Correntes nas chaves

O valor médio da corrente na chave S_0 é descrita pelas equações (326) e (327).

$$\mathbf{I_{S0Med} = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts} I_{S0}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{0}^{d_0*T_s} I_l(t)dt} \tag{326}$$

$$\boldsymbol{I_{S0Med} = \frac{d_0}{2} * [2 * ((I_{lmin})) + \Delta I_{lE1}\ )} \tag{327}$$

O valor eficaz da corrente na chave S_0 descrita pelas equações (328) e (329).

$$\mathbf{I_{S0Ef}{}^2 = \frac{1}{T}.\int_{0}^{Ts}[I_{S0}(t)]^2 dt = \frac{1}{T}.\int_{0}^{d_0*T_s}[I_l(t)]^2 dt} \tag{328}$$

$$\boldsymbol{I_{S0RMS}} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{d_0}}{\boldsymbol{3}}.(\boldsymbol{3}.\left[\left(\boldsymbol{I_{Lmin}}\right)\right]^{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{3}.[\boldsymbol{I_o}]^{\boldsymbol{2}}.\Delta\boldsymbol{I_{lE1}} + \Delta\boldsymbol{I_{LE1}^2}} \tag{329}$$

Os valores de corrente na chave S_3, tanto eficaz quanto médio, são iguais às da bateria, como descritas nas equações (322) e (323)

Não há condução de corrente nas chaves S_1 e S_2, logo tanto o valor eficaz da corrente quanto O valor médio da corrente são iguais a zero.

2.6.9 Correntes nos diodos

Os valores de corrente no diodo D_0, tanto eficaz quanto médio, são iguais as da chave S_0, determinado pelas equações (327) e (328).

Os valores de corrente do diodo D_1, D_4 e D_2 são iguais a zero pois não há condução neste modo de operação.

Os valores de corrente no diodo D_3, tanto eficaz quanto médio, são iguais aos da bateria, como descritas nas equações (329) e (330)

2.6.10 Ondulação da tensão no capacitor de entrada

Pela forma da onda da tensão no capacitor de entrada, há uma variação de corrente em estado de condução. A variação máxima ocorre do intervalo de tempo d_0 até o intervalo de tempo T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (330) e (331).

$$\int_{\boldsymbol{d0*Ts}}^{\boldsymbol{Ts}} \boldsymbol{dV_{Cin}} = \int_{\boldsymbol{d0*Ts}}^{\boldsymbol{Ts}} \frac{\boldsymbol{V_{Cin}(t)}}{\boldsymbol{C_{in}}} * \boldsymbol{dt} \tag{330}$$

$$\Delta\boldsymbol{V_{Cin}} = \frac{\boldsymbol{I_{pv}} * (\boldsymbol{1} - \boldsymbol{d_0})}{\boldsymbol{C_{in}} * \boldsymbol{f}} \tag{331}$$

2.7 Modo 6 – fluxo de potência da bateria para a carga

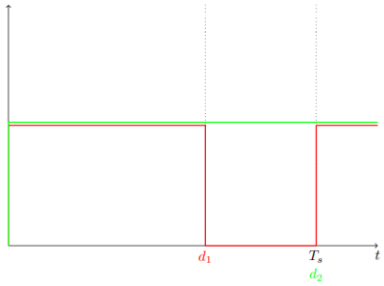
2.7.1 Etapas de operação

A análise do conversor operando no modo em que a bateria é a única entrada para alimentação da carga, sendo uma versão do modo 3 sem a sua etapa 1. A etapa 1 do modo 6 é igual a etapa 2 do modo 3, ver em 2.4.1. A etapa 2 do modo 6 é igual a etapa 2 do modo 1, ver em 2.2.1.

2.7.2 Formas de onda

As principais formas de onda das tensões estão ilustradas na Figura 64.

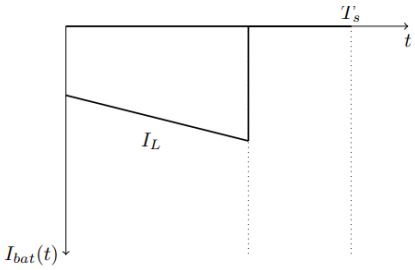
Figura 64 – Forma de onda do acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 65, a forma de onda teórica da corrente na bateria está ilustrada. É uma corrente pulsada, tendo o valor igual à da corrente no indutor entre d_2 e T_s., sendo negativa neste instante de tempo pois a bateria está fornecendo energia ao indutor.

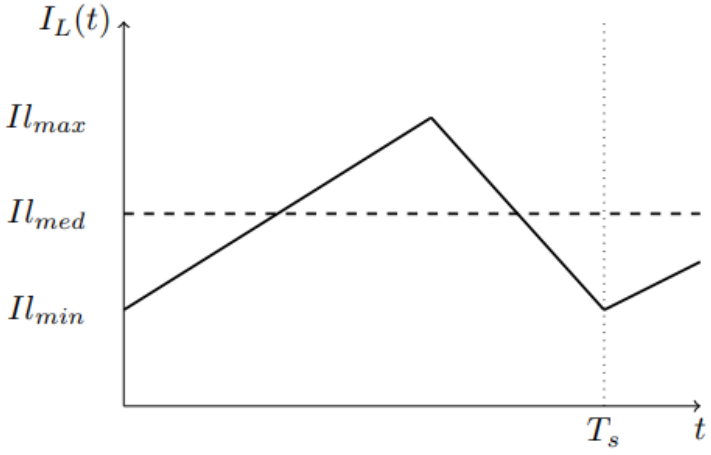
Figura 65 – Forma de onda da corrente na bateria no modo 6



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 66, a forma de onda teórica da corrente no indutor. No primeiro momento, há o carregamento do indutor, feito pela bateria, do início do período até d_1 e o intervalo de tempo de descarregamento, de d_0 até o fim do período.

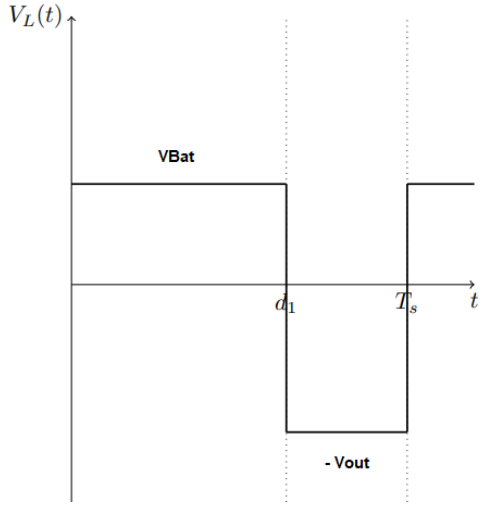
Figura 66 – Forma de onda da corrente no indutor no modo 6



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão no indutor está ilustrada na Figura 67, representando as tensões que carregam o indutor, sendo positiva, e as tensões relacionadas a descarga do indutor, sendo negativas.

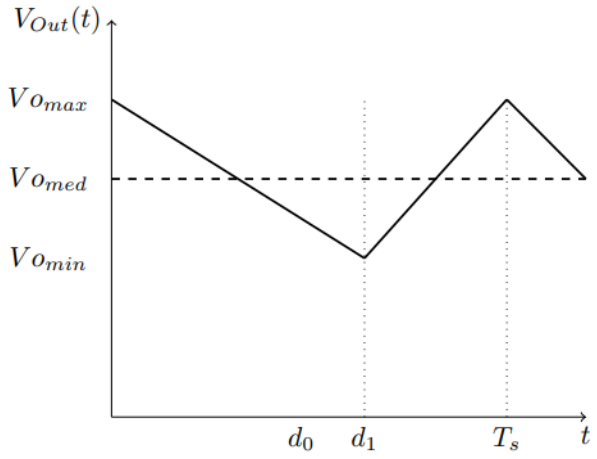
Figura 67 – Forma de onda da tensão do indutor no modo 6



Fonte: Produção do próprio autor.

As Figura 68 ilustra a forma de tensão no capacitor de saída, com a representação de sua oscilação.

Figura 68 –. Forma de onda da tensão no capacitor de saída no modo 6



Fonte: Produção do próprio autor.

2.7.3 Ganho estático

A equação do valor médio no indutor é descrita pela equação (332).

$$\frac{1}{T}\int_0^{T_s} V_l * dt = \int_0^{d_1 * T_s} V_{Bat}.dt + \int_{d_1 * T_s}^{T_s} -V_{Out}.dt \tag{332}$$

Como a tensão média do indutor é igual a zero, a solução é descrita pelas equações (333) até (335)

$$0 = V_{bat}.(d_1 * T_s) - V_{Cout}.(T_s - d_1 * T_s) \tag{333}$$

$$0 = V_{bat}.(d_1) - V_{Cout}.(1 - d_1) \tag{334}$$

$$V_{Cout} = \frac{V_{Bat}.(d_1)}{(1-d_1)} \tag{335}$$

Como a tensão no capacitor de saída é a tensão de saída na carga e a tensão no capacitor de entrada é a tensão nos terminais do painel fotovoltaico, o ganho estático de tensão pode ser calculado pela equação (336).

$$V_{Out} = \frac{V_{Bat}.(d_1)}{(1-d_1)} \tag{336}$$

2.7.4 Ondulação da corrente no indutor

A ondulação da corrente no indutor é descrita pelas equações (338) e (339).

$$\int_0^{d_1*T_s} dI_l = \int_0^{d_1*T_s} \frac{V_l(t)}{L} * dt \tag{337}$$

$$\Delta I_{LE1} = \frac{V_{pv} * d_1 * T_s}{L} = \frac{V_{bat} * d_1}{L * f} \tag{338}$$

2.7.5 Corrente no indutor

A Corrente mínima no indutor pode ser obtida a partir do valor médio da corrente no capacitor de saída, como descrita pelas equações (339) até (341).

$$\frac{1}{T}\int_0^{T_s} I_{Cout}.dt = \int_0^{d1*T_s} I_{Out}.dt + \int_{d1*T_s}^{T_s} -I_l(t) + I_{Out} \ .dt \tag{339}$$

$$0 = I_{Out}.T_s + \int_{d1*Ts}^{Ts} -I_l(t).dt \tag{340}$$

$$I_{Lmin} = \frac{I_o}{(1-d_1)} - \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{341}$$

Deste modo, o valor médio da corrente no indutor é calculado pela equação (342).

$$I_{Lmed} = I_{LMin} + \Delta I_{lE1}.0,5 \tag{342}$$

E o valor eficaz da corrente no indutor é descrita pelo pela equação (343) até (347).

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} [I_l \ (t)].dt \tag{343}$$

$$I_{Lef}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d1*Ts}\left[I_{Lmin} + \frac{V_{bat}}{L}.t\right]^2\right).dt + \left(\int_{d1*Ts}^{Ts}\left[(I_{Lmin}) - \frac{(V_{Out})}{L}.t\right]^2\right)\right] \quad (344)$$

$$I_{Lef} = \sqrt{a + c} \quad (345)$$

$$a = \frac{d_1}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \quad (346)$$

$$c = \frac{1 - d_1}{3}.(3.I_{Lmin}^2 + 3.I_{Lmin}.\Delta I_{lE3} + \Delta I_{LE3}^2) \quad (347)$$

2.7.6 Corrente no capacitor de saída

O valor eficaz da corrente é calculado pelas equações (348) até (350).

$$I_{Cinef}^2 = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts}\left[I_{Cout}^2(t)\right].dt \quad (348)$$

$$I_{CoutRMS}^2 = \frac{1}{T_s}.\left[\left(\int_0^{d_1*T_s}[I_o]^2\right).dt + \left(\int_{d_1*T_s}^{T_s}[(-I_L(t) + I_o)]^2\right)dt\right] \quad (349)$$

$$I_{Cout} = \sqrt{(d_1).I_o^2 + \frac{1-d_1}{3}.\left(3.\left[I_o - (I_{Lmin})\right]^2 + 3.[I_o - (I_{Lmin}^2)].\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2\right)} \quad (350)$$

2.7.7 Corrente na bateria

O valor médio da corrente na bateria é calculado pelas equações (351) e (352).

$$I_{batMed} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_0^{d_1*T_s} I_l(t)dt \quad (351)$$

$$I_{BatMed} = \frac{d_1}{2}.\left[2.\left((I_{lmin})\right) + \Delta I_{lE1}\right) \quad (352)$$

O valor eficaz da corrente na bateria descrita pelas equações (353) e (355).

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{Ts}[I_{Bat}(t)]^2\,dt\right) = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{d_1*T_s}[-I_l(t)]^2\,dt\right) \tag{353}$$

$$I_{BatRMS}^2 = \frac{d_1}{3}.(3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.[I_{lmin}]^2.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \tag{354}$$

$$I_{BatRMS} = \sqrt{\frac{d_1}{3}.(3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2 + 3.\left[\left(I_{Lmin}\right)\right]^2.\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2} \tag{355}$$

2.7.8 Correntes nas chaves

Não há condução de corrente na chave S_0, logo tanto o valor eficaz da corrente quanto Valor médio da corrente são iguais a zero.

A chave S_1 tem valores de valor eficaz da corrente e média iguais aos da bateria, como descritas nas equações (353) e (354);

A chave S_2 se mantém acionada durante todo os estados. Assim, o valor médio da corrente e valor eficaz da corrente são iguais aos valores da corrente no indutor.

Não há condução de corrente na chave S_3, logo tanto o valor eficaz da corrente quanto Valor médio da corrente são iguais a zero.

2.7.9 Correntes nos diodos

Não há condução de corrente no diodo D_0 e no diodo D_2, logo tanto o valor eficaz e médio da corrente são iguais a zero.

Valor médio da corrente no Diodo D_1 é descrita pelas equações (356) e (357).

$$I_{D1Med} = \frac{1}{T}.\int_0^{Ts} I_{Bat}(t)dt = \frac{1}{T}.\int_{d_1*T_s}^{Ts} I_l(t)dt \tag{356}$$

$$I_{D1Med} = \frac{1 - d_1}{2}.\left[2.\left((I_{lmin})\right) + \Delta I_{lE1}\right) \tag{357}$$

O valor eficaz da corrente no Diodo D_1 descrita pelas equações (358) até (360).

$$I_{D1RMS}^2 = \frac{1}{T}.\left(\int_0^{Ts}[I_{Bat}(t)]^2\,dt\right) = \frac{1}{T}.\left(\int_{d_1*T_s}^{Ts}[-I_l(t)]^2\,dt\right) \tag{358}$$

$$I_{d1RMS}^2 = \frac{1 - d_1}{3}.(3.[(I_{Lmin})]^2 + 3.[I_{lmin}]^2 .\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2) \quad (359)$$

$$I_{d1RMS} = \sqrt{\frac{1 - d_1}{3}.(3.[(I_{Lmin})]^2 + 3.[I_{lmin}]^2 .\Delta I_{lE1} + \Delta I_{LE1}^2)} \quad (360)$$

Não há condução de corrente no diodo D_3, logo tanto os valores eficazes e médios da corrente são iguais a zero. Os valores de corrente no diodo D_4, tanto eficaz quanto médio, são iguais do indutor, como calculados nas equações (345) e (348).

2.7.10 Ondulação da tensão no capacitor de saída

A variação máxima ocorre do intervalo de tempo zero até o intervalo de tempo d_1*T_s, assim, a variação de tensão pode ser descrita pelas equações (361) e (362).

$$\int_0^{d_0*T_s} dV_{Cout} = \int_0^{d_1*T_s} \frac{V_{Cout}(t)}{C_{out}} * dt \quad (361)$$

$$\Delta V_{Cout} = \frac{V_{Out} * (d_1)}{R * C_{out} * f} \quad (362)$$

2.8 Simulações computacionais

2.8.1 Especificações

Para o teste da topologia proposta, foi considerado um painel fotovoltaico de 60 W simulado pelo *software* PSIM com as seguintes especificações apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Elementos do painel fotovoltaico modelado pelo PSIM

Elementos	Valores
Potência máxima (W)	60
Tensão no ponto de máxima potência (V)	17,1
Corrente no ponto de máxima potência (A)	3,55
Tensão de circuito aberto (V)	21,1
Corrente de curto circuito (A)	3,8

Fonte: Produzido pelo autor.

Os valores da indutância e da capacitância serão determinados a partir dos valores de oscilação obtidos na análise dos modos de operação. Como são vários modos, será adotado o maior valor. A tensão de bateria a ser considerada será o valor de 6 V. Para os testes, serão considerados uma frequência de operação de 50 kHz e uma carga resistiva de 10 Ohms. A tensão de saída para todos os modos a ser considerada é de 24 V.

2.8.2 Capacitor de entrada

A equação da ondulação do capacitor de entrada, $\Delta \boldsymbol{V_{Cin}}$, é a mesma em todos os modos que envolvem o painel fotovoltaico como fonte de entrada de potência. Deste modo, o valor de capacitância de entrada, $\boldsymbol{C_{in}}$, deve ser obtido a partir de um ripple, $\Delta \boldsymbol{V_{in}}$, de no máximo de 0,5%. Na equação (370), d_x é a razão cíclica d_o para todos os modos exceto o caso 6, já que neste não há a participação do painel fotovoltaico. Para considerar o caso máximo, (d_x) será considerado igual a um, ocorrendo assim o maior valor possível do ripple. O valor de capacitância de entrada de entrada deve ser obtido a partir de um ripple de no máximo de 0,5%. As equações (367) a (373) descrevem o processo de determinação do capacitor de entrada.

$$\Delta \boldsymbol{V_{in}} = \mathbf{0,5\%} * \boldsymbol{Vpv_{Max}} \tag{363}$$

$$\Delta \boldsymbol{V_{in}} = \mathbf{0,5\%} * \mathbf{21,1} \tag{364}$$

$$\Delta \boldsymbol{V_{in}} = \mathbf{0,1055}\ \boldsymbol{V} \tag{365}$$

$$\Delta \boldsymbol{V_{Cin}} = \frac{\boldsymbol{I_{pv}} * (\mathbf{1} - \boldsymbol{d_x})}{\boldsymbol{C_{in}} * \boldsymbol{f}} \tag{366}$$

$$\boldsymbol{C_{in}} = \frac{\boldsymbol{I_{pv}} * (\mathbf{1} - \boldsymbol{x})}{\Delta \boldsymbol{V_{Cin}} * \boldsymbol{f}} \tag{367}$$

$$\boldsymbol{Cin} = \frac{\mathbf{3,55} * \mathbf{1}}{\mathbf{0,1055} * \mathbf{50} * \mathbf{10^3}} \tag{368}$$

$$\boldsymbol{Cin} = \mathbf{663,50}\ \boldsymbol{\mu F} \tag{369}$$

2.8.3 Indutor

A equação do ripple do Indutor, $\Delta \boldsymbol{I_{LMax}}$, é a mesma para todos os modos considerando a última etapa. O valor do indutor de entrada, $\boldsymbol{L}$, deve ser obtido a partir de um ripple de no máximo de 40%. As equações (370) a (386) descrevem o processo de determinação do indutor. Na equação (373), dx é a razão cíclica d_2 para os modos 1 e 2, d_1 para o modo 3 e 6 e d_0 para os modos 4 e 5. Para considerar o caso máximo, $(1-d_x)$ será considerado igual a um, ocorrendo assim o maior valor possível do ripple.

$$\Delta \boldsymbol{I_{LMax}} = \mathbf{40\%} * \boldsymbol{Il_{Max}} \tag{370}$$

$$\Delta \boldsymbol{I_{LMax}} = \mathbf{40\%} * \mathbf{3,31} \tag{371}$$

$$\boldsymbol{I_{LMax}} = \mathbf{1,324}\ \boldsymbol{A} \tag{372}$$

$$\Delta \boldsymbol{I_{LMax}} = \frac{\boldsymbol{V_{out}} * (\mathbf{1} - \boldsymbol{d_x})}{\boldsymbol{L} * \boldsymbol{f}} \tag{373}$$

$$\boldsymbol{L} = \frac{\boldsymbol{V_{out}} * (\mathbf{1} - \boldsymbol{d_x})}{\Delta \boldsymbol{I_{LMax}} * \boldsymbol{f}} \tag{374}$$

$$\boldsymbol{L} = \frac{\mathbf{24} * (\mathbf{1})}{\mathbf{1,324} * \mathbf{50} * \mathbf{10^3}} \tag{375}$$

$$\boldsymbol{L} = \mathbf{362,54}\ \boldsymbol{\mu H} \tag{376}$$

2.8.4 Capacitor de saída

A equação do ripple do capacitor de saída, $\Delta \boldsymbol{V_{Cout}}$, é a mesma em todos os modos, mudando somente a razão cíclica a ser considerada. A tensão máxima a ser considerada é 24 V, a tensão de trabalho deste conversor. Na equação (380), d_x é a razão cíclica d_1 para o modo 6 e d_0 para os outros modos exceto o 5. Para considerar o caso máximo, (d_x) será considerado igual a um, ocorrendo assim o maior valor possível do ripple. O valor de capacitância de saída, $\boldsymbol{C_{out}}$, deve ser obtido a partir de um ripple de no máximo de 0,5%.

$$\Delta V_{out} = 0,5\% * Vout \tag{377}$$

$$\Delta V_{in} = 0,5\% * 24 \tag{378}$$

$$\Delta V_{in} = 0,12\ V \tag{379}$$

$$\Delta V_{Cout} = \frac{V_{Out} * (d_x)}{R * C_{out} * f} \tag{380}$$

$$C_{out} = \frac{V_{Out} * (d_x)}{R * \Delta V_{Cout} * f} \tag{381}$$

$$C_{out} = \frac{24 * (1)}{10 * 0,12 * 50 * 10^3} \tag{382}$$

$$C_{out} = 400\ \mu F \tag{383}$$

2.9 Operação do conversor

2.9.1 Acionamento das chaves

Para garantir que ocorram somente os modos determinados e que não exista uma combinação de acionamento de chaves que possa causar um mau funcionamento, como um curto circuito, é preciso que certas condições sejam estabelecidas:

- A chave S_0 é determina o ponto de operação do painel fotovoltaico
- A chave S_2, S_1 e S_3 só podem estar no nível lógico 1 caso a chave S0 esteja no nível lógico zero. Isto garante que a etapa de carregamento do indutor pelo painel fotovoltaico, presente em todos os modos, seja obedecido e o indutor carregue corretamente.
- A chave S_1 só é usada quando a bateria for porta de saída. Para não ocorrer curto circuito, a chave S_1 só pode estar no nível lógico 1 caso a chave S esteja também no nível lógico 1. Isto impede um caminho entre o diodo D_1 e a chave S_1 que geraria um curto circuito.

- Caso a chave S_3 esteja acionada junto com a chave S_2, haverá um curto circuito. A chave S_3 só poderá estar em nível lógico 1 caso a chave S_2 esteja no nível lógico zero.

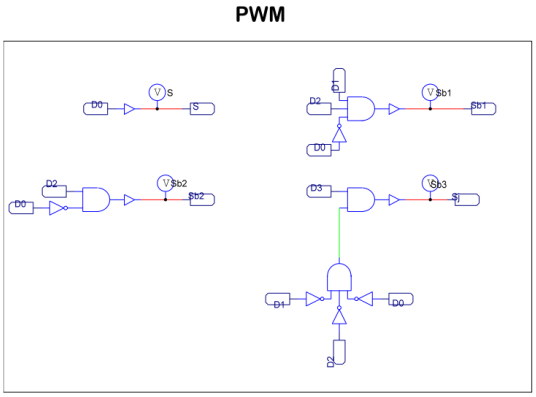
Com estas condições, o circuito lógico combinacional se resume nas equações (384) até (386). A Figura 69 ilustra a implementação das equações por portas lógicas.

$$\boldsymbol{S_2^{'} = S_2 * \overline{S_0}} \tag{384}$$

$$\boldsymbol{S_1^{'} = S_2 * \overline{S_{0*}} * S_1} \tag{385}$$

$$\boldsymbol{S_3^{'} = \overline{S_2} * \overline{S_{0*}} * \overline{S_1} * S_3} \tag{386}$$

Figura 69 – Sinal de Saída de acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

2.10 Especificações do conversor

O Conversor proposto operará com o propósito de se obter 24 V na tensão de saída e seguindo as especificações apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Especificações do conversor

Elementos	Valores
Valor médio da tensão na saída (V_{out})	24 V
Tensão de entrada da bateria (V_{batt})	6 V
Tensão de entrada máxima (V_{in})	17,4 V
Carga resistiva (R)	10 Ω
Frequência de chaveamento (f)	50 kHz

Fonte: Produção do próprio autor.

A potência de saída, P_{out}, está descrita pela equação (387).

$$\boldsymbol{P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R} = \frac{24^2}{10} = 57,6\ W} \tag{387}$$

Serão considerados as operações dos três primeiros modos do conversor. Os outros modos são derivados dos três primeiros, como especificado nos tópicos 3.4.1, 3.5.1 e 3.6.1

2.10.1 Modo 1 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

O valor da razão cíclica, d_0, calculado na equação (388), é obtido pela equação do ganho estático conforme equação (68).

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{V_{Out} + V_{Bat} * (1 - d_2)}{V_{Out} + V_{in}}} \tag{388}$$

Para manter a tensão constante de 24 V, será considerado d_2 igual a 0,94. Assim, d_0 é calculado pela equação (389).

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{24 + 6 * (1 - 0,94)}{24 + 17,4} = 0,588} \tag{389}$$

Os Quadros 3 até 7 apresentam os valores calculados de corrente média e eficaz para cada elemento do circuito pelas fórmulas presentes dos itens 3.1.3 até 3.1.10. No Quadro 4 estão os valores de corrente média e eficaz nos capacitores na operação no modo 1 para as razões cíclicas descritas.

Quadro 3 – Valores de corrente no indutor no modo 1

Elementos	Valor	Equação
Valor médio da corrente no indutor	5,58 A	79
Valor eficaz da corrente no indutor	5,86 A	83

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 4 – Valores de corrente dos capacitores no modo 1

Elementos	Valor	Equação
Valor eficaz da corrente no capacitor de entrada	2,90 A	93
Valor eficaz da corrente no capacitor de saída	2,88 A	96

Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 5 estão os valores relativos a operação no modo 1 para as razões cíclicas descritas para a bateria.

Quadro 5 – Valores de corrente na bateria no modo 1

Elementos	Valor	Equação
Valor médio da corrente na bateria	0,337 A	98
Valor eficaz da corrente na bateria	1,37 A	100

Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 6 estão os valores relativos a operação das chaves S_0, S_1, S_2 e S_3 no modo 1.

Quadro 6 – Valores das correntes das chaves no modo 1

Elementos	Valores Médios	Valores Eficazes	Equações
Chave S_0	3,44 A	4,49 A	103, 105
Chave S_1	0 A	0 A	
Chave S_2	2,08 A	3,50 A	106,108
Chave S_3	0 A	0 A	

Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 7 estão os valores relativos a operação de todos os diodos no modo 1.

Quadro 7 – Valores das Correntes dos diodos no modo 1

Elementos	Valor médio	Valor Eficaz	Equação
Diodo D_0	3,44 A	4,49 A	103,105
Diodo D_1	0,33 A	1,37 A	116,120
Diodo D_2	2,41 A	3,76 A	112,115
Diodo D_3	0 A	0 A	
Diodo D_4	2,41 A	3,76 A	251,253

Fonte: Produção do próprio autor.

2.10.2 Modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

O valor da razão cíclica, calculado na equação (390), é obtido pela equação do ganho estático conforme equação (146).

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{V_{Out} + V_{Bat} * (1 - d_2)}{V_{Out} + V_{in}}} \tag{390}$$

Para manter a tensão constante de 24 V, será considerado d_2 igual 0,96. Assim, d_0 é calculado pela equação (391).

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{24 + 6 * (1 - 0,96)}{24 + 17,4} = 0,562} \tag{391}$$

Os Quadros 8 até 12 apresentam os valores calculados de corrente média e eficaz para cada elemento do circuito pelas fórmulas presentes dos itens 3.2.3 até 3.2.10.

Quadro 8 – Valores de corrente no indutor no modo 2

Elementos	Valores	Equação
Valor médio da corrente no indutor	6,06 A	227
Valor eficaz da corrente no Indutor	6,06 A	229

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 9 – Valores de corrente dos capacitores no modo 2

Elementos	Valor	Equação
Valor eficaz da corrente no Capacitor de Entrada	2,84 A	231
Valor eficaz da corrente no Capacitor de Saída	2,96 A	234

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 10 – Valores de corrente na bateria no modo 2

Elementos	Valor	Equação
Valor médio da corrente da Bateria	0,232 A	236
Valor eficaz da corrente da Bateria	1,16 A	239

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 11 – Valores das correntes das chaves no modo 2

Elementos	Valor médio	Valor Eficaz	Equação
Chave S_0	3,41 A	4,55 A	241,244
Chave S_1	0 A	0 A	
Chave S_2	2,41 A	3,83 A	246,249
Chave S_3	0,232 A	1,16 A	236,239

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 12 – Valores das Correntes dos diodos no modo 2

Elementos	Valor médio	Valor Eficaz	Equação
Diodo D_0	3,41 A	4,55 A	241,244
Diodo D_1	0,232 A	1,16 A	236,239
Diodo D_2	2,41 A	3,83 A	246,249
Diodo D_3	0,232 A	1,16 A	236,239
Diodo D_4	2,64 A	4,00 A	236,239

Fonte: Produção do próprio autor.

2.10.3 Modo 3 - fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga

A partir da equação (320) e pelos valores apresentado no Quadro 1, os valores das razões cíclicas são calculados pela equação (392).

Para este caso, será considerado o painel fotovoltaico trabalhando abaixo de sua potência máxima, com a tensão de saída do painel fotovoltaico em 18,8 V.

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{V_{Out} * (1 - d_1) - V_{bat}(d_1)}{V_{in} - V_{bat}}} \tag{392}$$

Para manter a tensão constante de 24 V, será considerado d_1 igual 0,61. Assim, d_0 é calculado pela equação (665).

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{24 * (1 - 0,61) - 6 * 0,61}{18,8 - 6} = 0,445} \tag{393}$$

Os Quadros 13 até 17 apresentam os valores calculados de corrente média e eficaz para cada elemento do circuito pelas fórmulas presentes dos itens 3.31 até 3.3.10.

Quadro 13 – Valores de corrente no indutor no modo 3

Elementos	Valor	Equação
Valor médio da corrente no indutor	6,19 A	345
Valor eficaz da corrente no Indutor	6,19 A	348

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 14 – Valores de corrente dos capacitores no modo 3

Elementos	Valor	Equação
Valor eficaz da corrente no Capacitor de Entrada	3,05 A	360
Valor eficaz da corrente no Capacitor de Saída	3,02 A	363

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 15 – Valores de corrente na bateria no modo 3

Elementos	Valor	Equação
Valor médio da corrente na Bateria	-1,06 A	365
Valor eficaz da corrente na Bateria	2,61 A	368

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 16 – Valores das correntes das chaves no modo 3

Elementos	Valor Médios	Valor Eficazes	Equação
Chave S_0	2,71 A	4,08 A	370,372
Chave S_1	1,06 A	2,61 A	375,377
Chave S_2	3,40 A	4,66 A	379,381
Chave S_3	0 A	0 A	

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 17 - Valores das Correntes dos diodos no modo 3

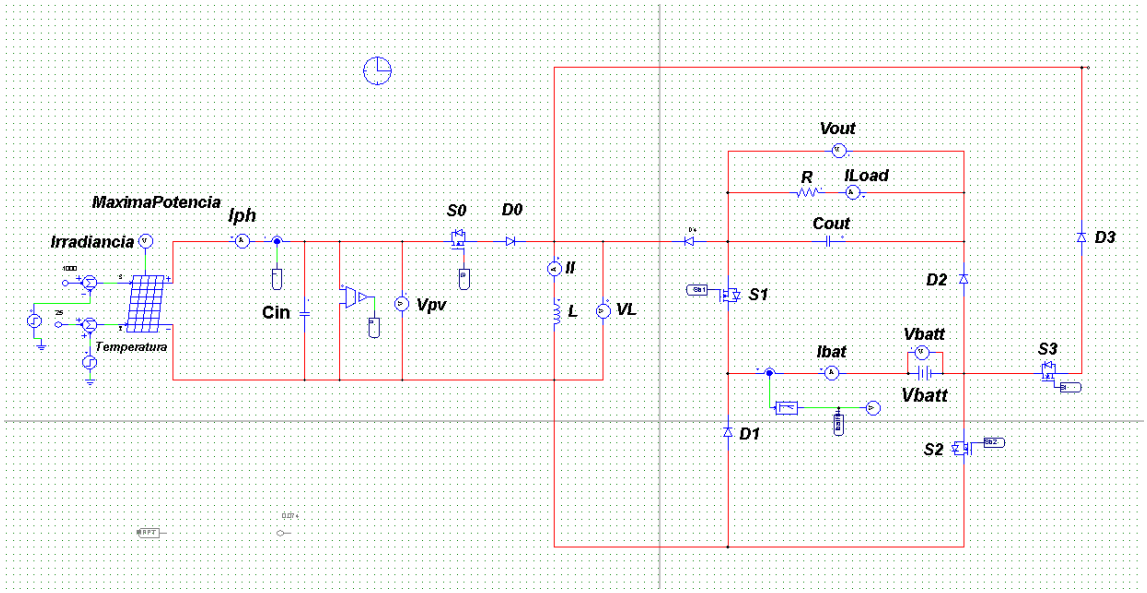
Elementos	Valor Médios	Valor Eficazes	Equação
Diodo D_0	2,71 A	4,08 A	370,372
Diodo D_1	0 A	0 A	
Diodo D_2	2,41 A	3,86 A	383,386
Diodo D_3	0 A	0 A	
Diodo D_4	3,46 A	4,66 A	378,381

Fonte: Produção do próprio autor.

2.11 Simulação

A simulação para todos os casos foi feita a partir do circuito implementado no *software*, como ilustrado na Figura 70.

Figura 70 – Circuito Implementado

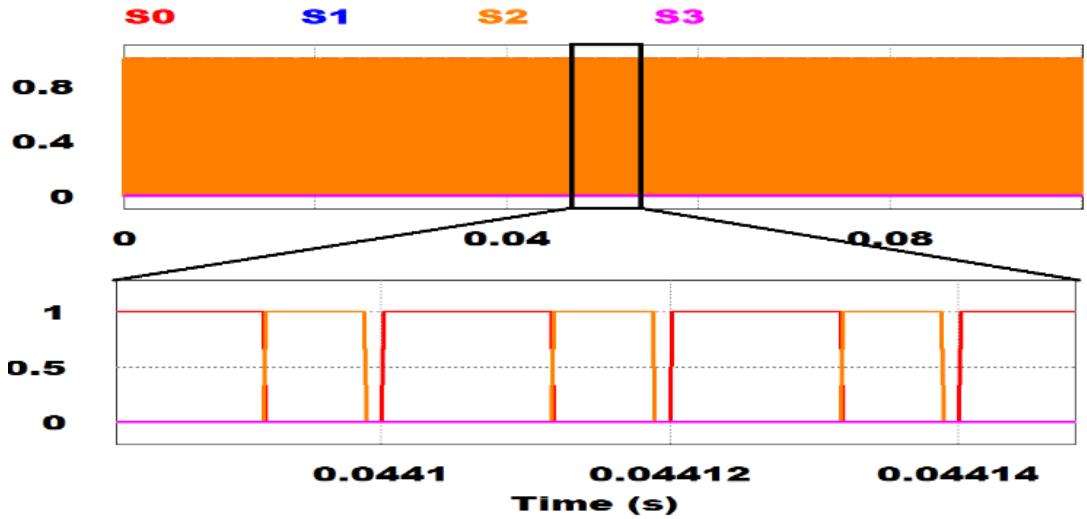


Fonte: Produzido pelo autor.

2.11.1 Conversor no modo 1 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

Nesta operação, as chaves S_1 e S_3 ficam ambas desligadas. Assim, a chave S_2 fica responsável por controlar a tensão de saída. Será realizado uma simulação com S_0 tendo razão cíclica igual a 0,59 e S_2 igual a 0,94, como calculado no item 4.3.1. A Figura 71 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s.

Figura 71 – Acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

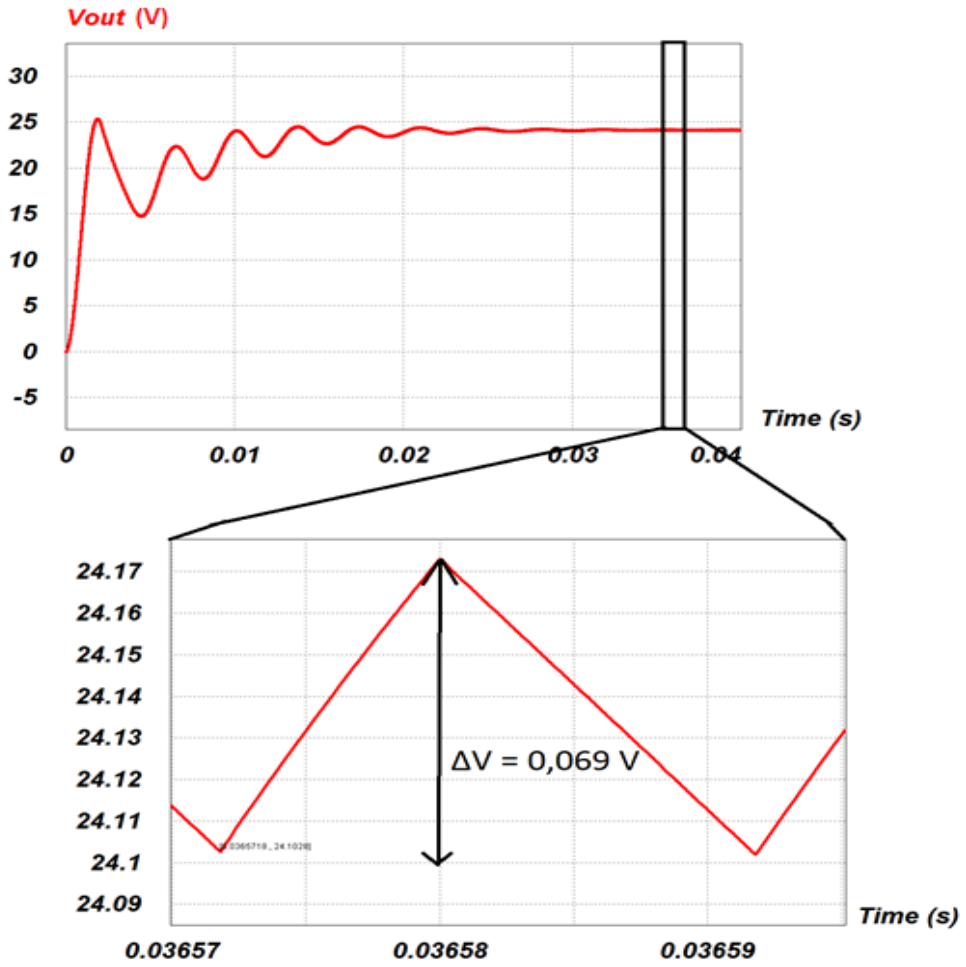
A Figura 72 ilustra a curva de tensão de saída e seu ripple de 0,069 V, abaixo do valor limite usado para determinação do valor de capacitância, como calculado pela equação (383).

Usando a fórmula presente na equação (384) e para o valor de tensão de saída do conversor de 24 V, o valor calculado é 0,0708 V.

Assim, o valor obtido na simulação está dentro do valor proposto de capacitância para uma amplitude máxima de tensão de 0,12 V, como calculado no item 4.1.3. A Figura 73 ilustra as curvas de potência nas portas.

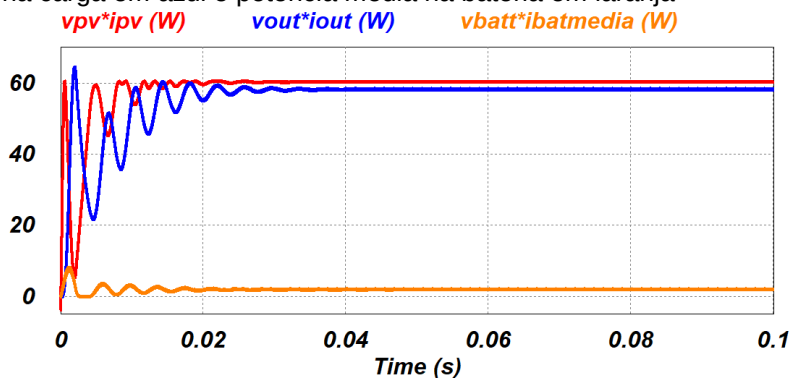
Neste modo de operação, a potência do painel fotovoltaico é igual à da bateria e da carga.

Figura 72 – Ripple da tensão de saída



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 73 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja

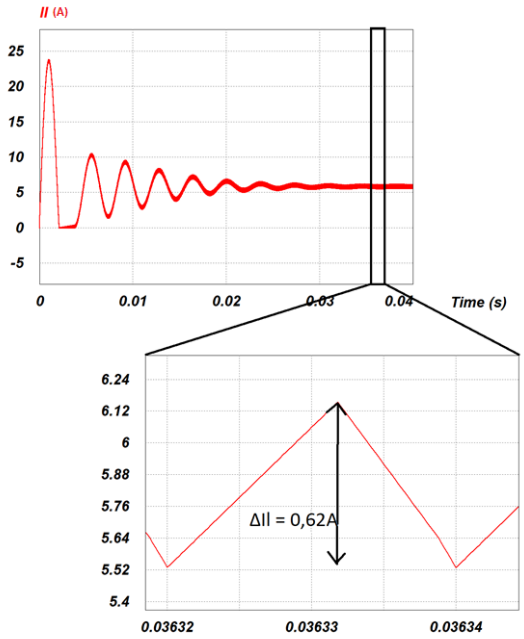


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 74 ilustra a curva da corrente no indutor e seu ripple de 0,62 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A calculado na equação (376).

Considerando o valor calculado da equação (377), o valor obtido de 0,624 A. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2.

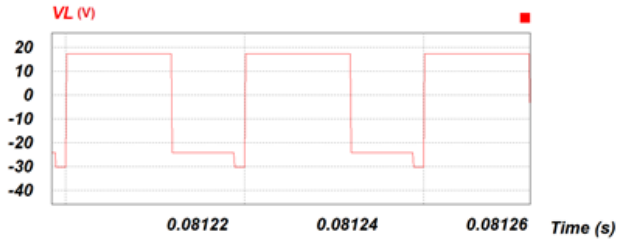
Figura 74 – Ripple na corrente no indutor



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda no indutor apresenta uma mudança na inclinação da reta próximo ao fim do período. Isto se deve pois neste intervalo de tempo há a mudança da tensão nos terminais do indutor na qual o indutor está descarregando, sendo anteriormente a tensão de saída na carga e depois a tensão de saída na carga somada a tensão da bateria. A Figura 75 ilustra este efeito.

Figura 75 – Forma de onda da tensão no indutor



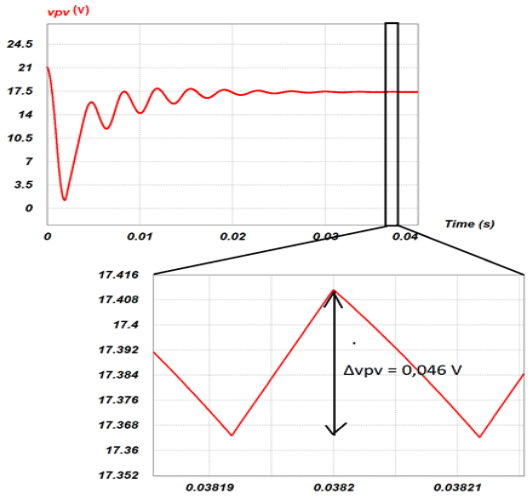
Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 76 ilustra a curva de tensão de entrada e seu ripple de 0,046 V, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 0,1055 V calculado na equação (369).

Considerando o valor calculado da equação (370), o valor obtido de 0,046 V para um valor de corrente na entrada no regime permanente de 3,43 A, como ilustrado na Figura 76.

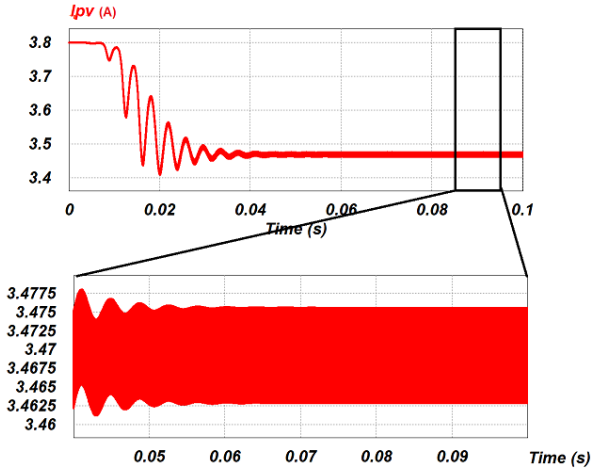
Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.1.

Figura 76 – Ripple da tensão de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

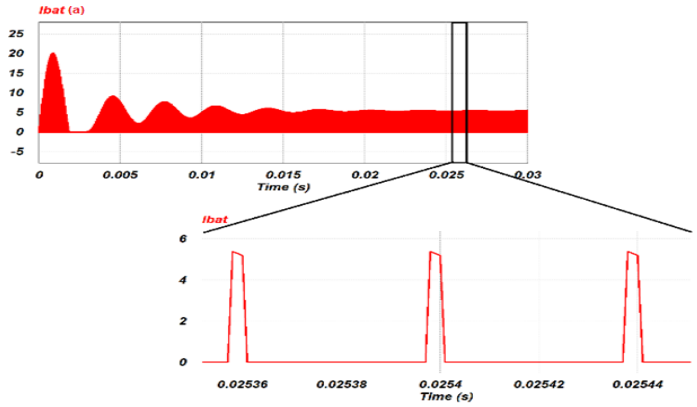
Figura 77 – Valor da corrente de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 78 ilustra a curva de corrente na bateria. A corrente é pulsada e positiva, indicando que a bateria está carregando, e está com valor de pico de aproximadamente 5 A.

Figura 78 – Corrente de saída da bateria

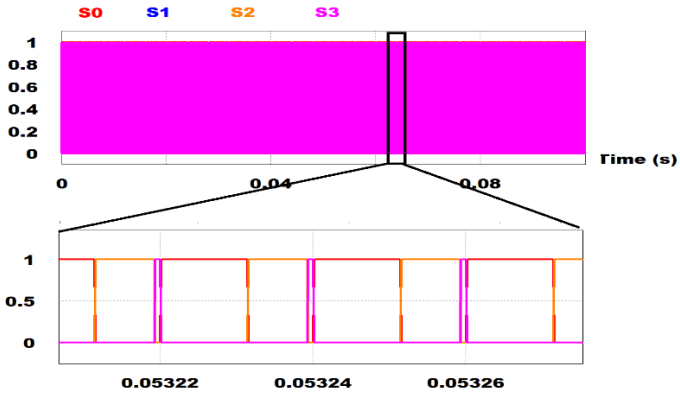


Fonte: Produção do próprio autor.

2.11.2 Conversor no modo 2 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga e a bateria

Nesta operação, as chaves S_1 e S_3 ficam com valores de razão cíclica iguais a 0 e 1, respectivamente. Assim, a diferença entre a razão cíclica de S_2 e S_0 é responsável por controlar a tensão de saída. Será realizado uma simulação com o valor da razão cíclica de S_0 igual a 0,57 e S_2 igual a 0,96. A Figura 79 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s.

Figura 79 – Acionamento das chaves

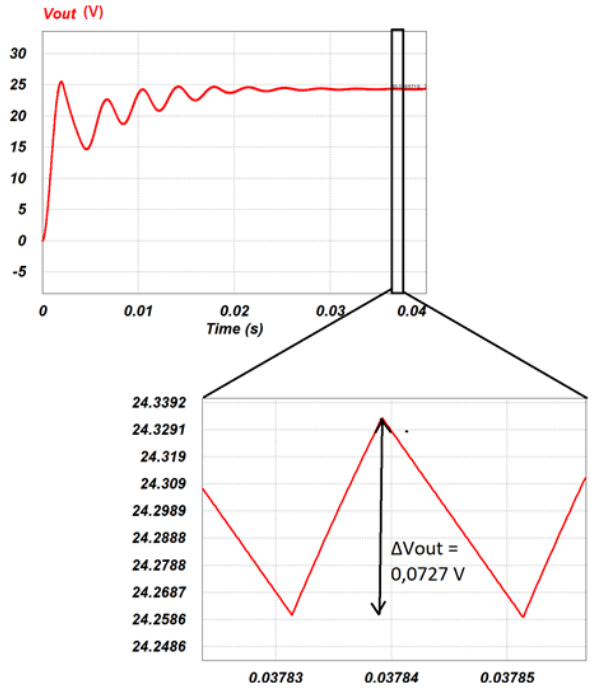


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 80 ilustra a curva de tensão de saída e seu ripple de 0,0727 V, abaixo do valor limite usado para determinação do valor de capacitância, como descrito pelas equações (383). Usando a fórmula presente na equação (384) e para o valor de tensão de saída do conversor de 24 V, o valor calculado é 0,0684 V. Assim, o valor obtido na

simulação está dentro do valor proposto de capacitância para uma amplitude máxima de tensão de 0,12 V, como calculado no item 4.1.3

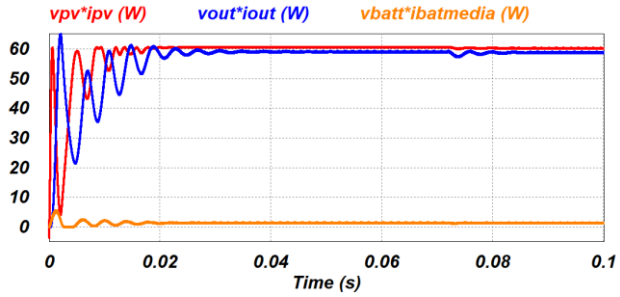
Figura 80 – Ripple da tensão de saída



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 81 ilustra as curvas de potência nas portas. Neste modo de operação, a potência do painel fotovoltaico é igual à da bateria e da carga.

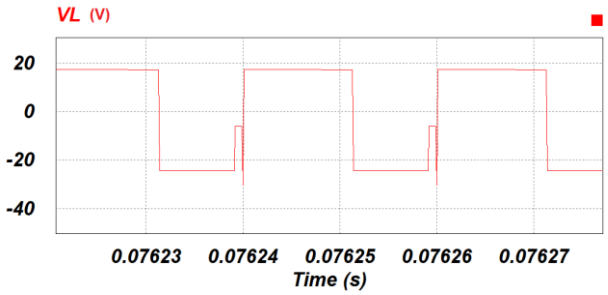
Figura 81 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda no indutor apresenta uma mudança na inclinação da reta próximo ao fim do período. Isto se deve pois neste intervalo de tempo há a mudança da tensão nos terminais do indutor na qual o indutor está descarregando, sendo anteriormente a tensão de saída na carga e depois a tensão da bateria. A Figura 82 ilustra este efeito

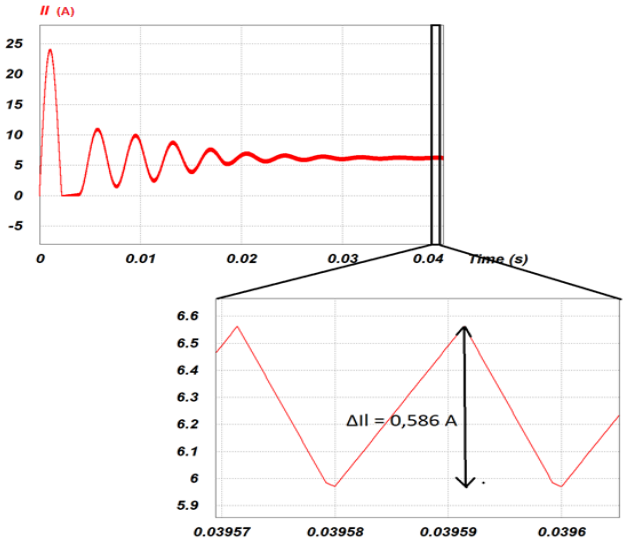
Figura 82 – Forma de onda da tensão do indutor



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 83 ilustra a curva da tensão no indutor e seu ripple de 0,586 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A calculado na equação (376). Considerando o valor calculado da equação (377), o valor obtido de 0,602 A. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2.

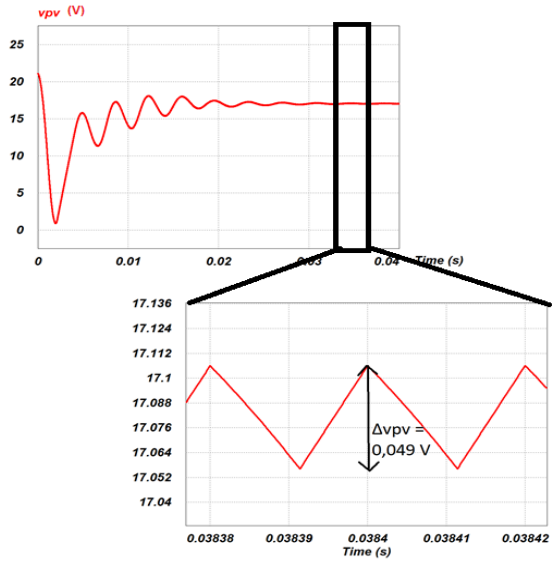
Figura 83 – Ripple na corrente no indutor



Fonte: Produção do próprio autor.

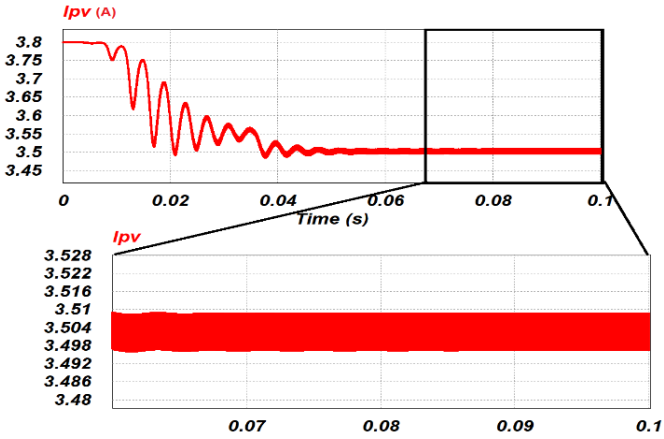
A Figura 84 ilustra a curva de tensão de entrada e seu ripple de 0,049 V, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 0,1055 V calculado na equação (369). Considerando o valor calculado da equação (370), o valor obtido de 0,050 V para um valor de corrente na entrada no regime permanente de 3,55 A, como ilustrado na Figura 85. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.1.

Figura 84 – Ripple da tensão de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

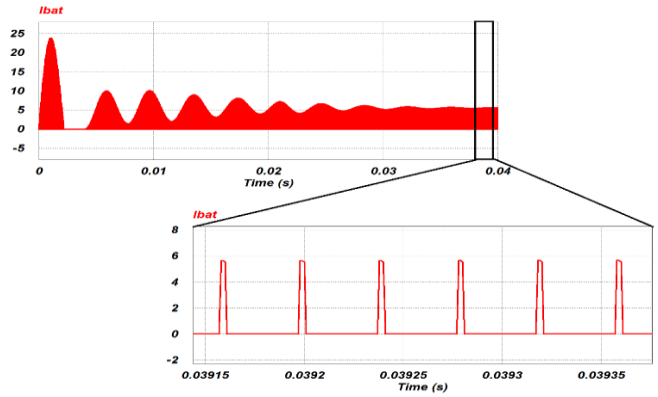
Figura 85 – Corrente de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 86 ilustra a curva de corrente na bateria. A corrente é pulsada, com um valor de pico de aproximadamente 5 A. Como é positiva, a bateria está sendo carregada.

Figura 86 – Corrente da bateria



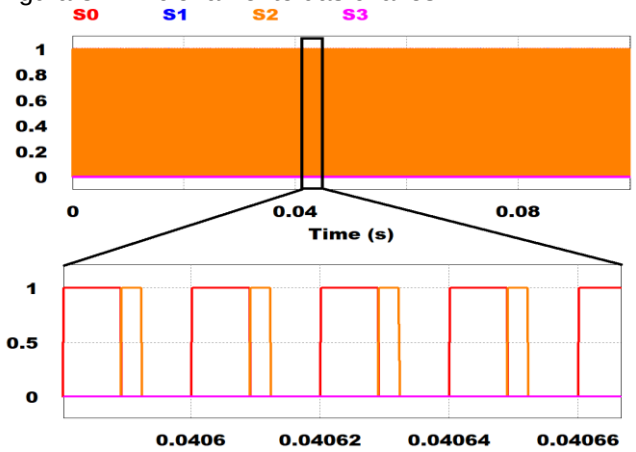
Fonte: Produção do próprio autor.

2.11.3 Conversor no modo 3 - fluxo de potência do painel fotovoltaico e da bateria para a carga

Nesta operação, as chaves S_2 e S_3 ficam com valores de razão cíclica iguais a 1 e 0, respectivamente. Assim, a diferença entre a razão cíclica da chave S_1 e chave S_0 é responsável por controlar a tensão de saída. Será realizado uma simulação com o valor da razão cíclica de S_0 igual a 0,45 e S_1 igual a 0,61.

A Figura 87 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s

Figura 87 – Acionamento das chaves

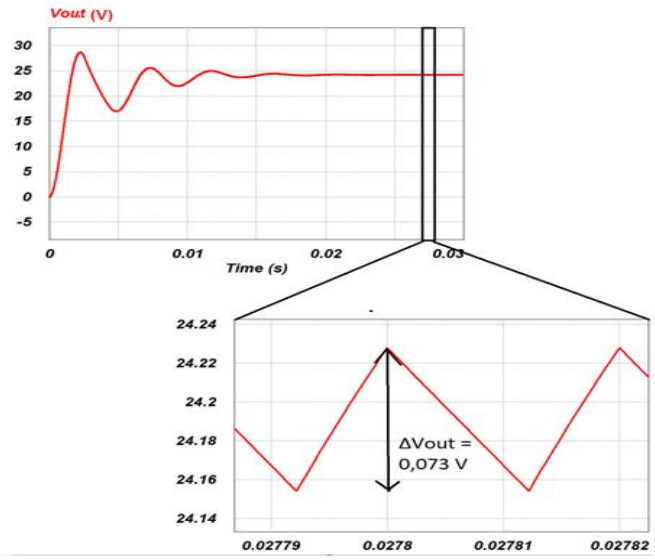


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 88 ilustra a curva de tensão de saída e seu ripple de 0,073 V, abaixo do valor limite usado para determinação do valor de capacitância, como descrito pelas equações (383). Usando a fórmula presente na equação (384) e para o valor de tensão

de saída do conversor de 24 V, o valor calculado é 0,073 V. Assim, o valor obtido na simulação está dentro do valor proposto de capacitância para uma amplitude máxima de tensão de 0,12 V, como calculado no item 4.1.3.

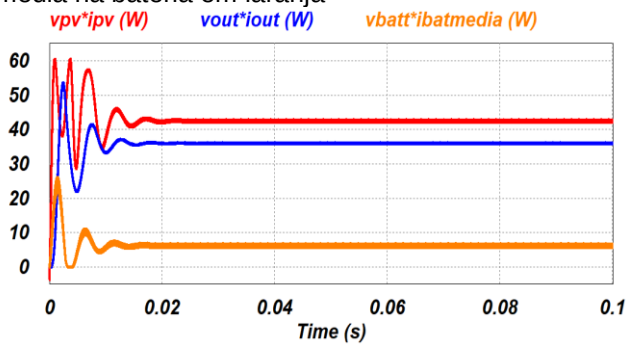
Figura 88 – Ripple da tensão de saída



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 89 ilustra as curvas de potência nas portas. Neste modo de operação, a potência do painel fotovoltaico somadas da bateria é igual à da carga.

Figura 89 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja

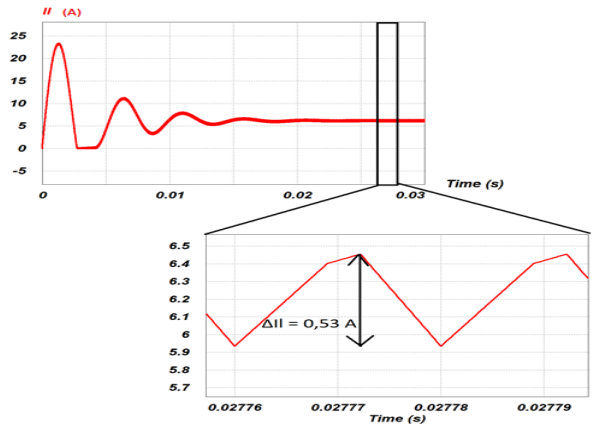


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 90 ilustra a curva da corrente no indutor com o ripple de 0,52 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A. calculado na equação (373). Considerando o valor calculado da equação (374), o valor obtido de 0,521 A para a

tensão de saída do conversor em 24 V. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2.

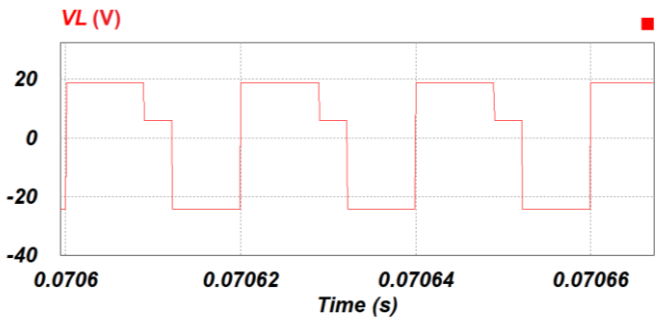
Figura 90 – Ripple na corrente no indutor.



Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda no indutor apresenta uma mudança na inclinação enquanto está sendo carregado. Isto se deve pois neste intervalo de tempo há a mudança da tensão nos terminais do indutor na qual o indutor está carregando, sendo anteriormente a tensão nos terminais do painel fotovoltaico e depois a tensão da bateria. A Figura 91 ilustra este efeito.

Figura 91 – Tensão no Indutor

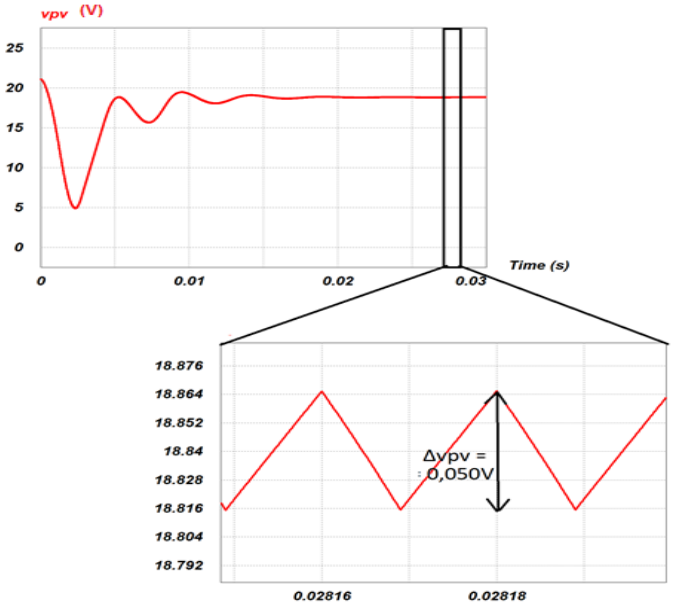


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 92 ilustra a curva de tensão de entrada e seu ripple de 0,050 V, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 0,1055 V calculado na equação (369). Considerando o valor calculado da equação (370), o valor obtido de 0,050 A para um

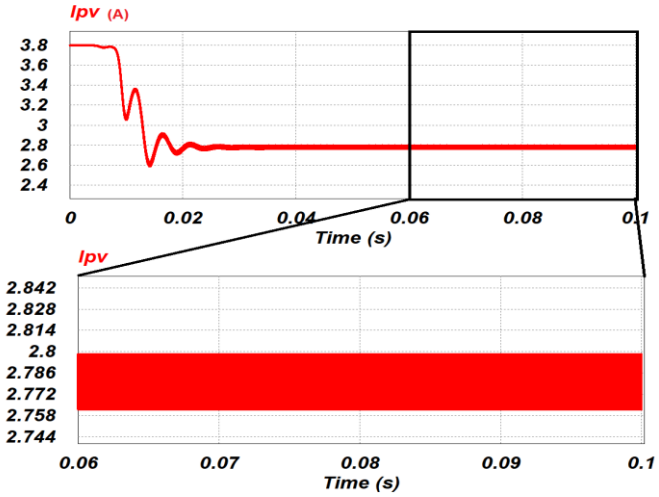
valor de corrente na entrada no regime permanente de 3,55 A, como ilustrado na Figura 93. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.1.

Figura 92 – Ripple da tensão de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

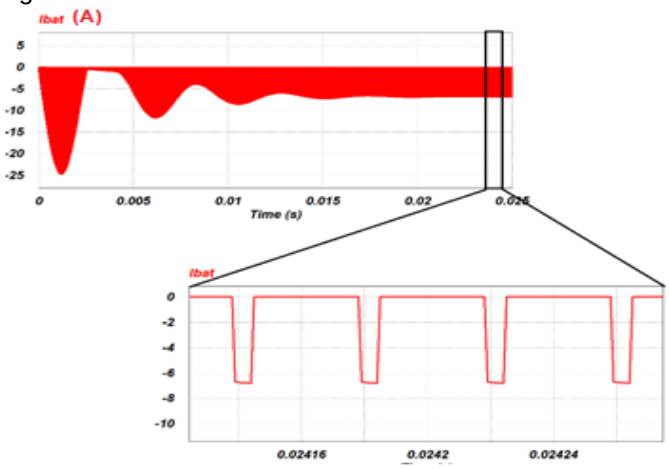
Figura 93 – Curva da corrente de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

A corrente da bateria, ilustrada na Figura 94, é pulsada com os valores de pico negativos pois está fornecendo energia a carga.

Figura 94 – Corrente da bateria



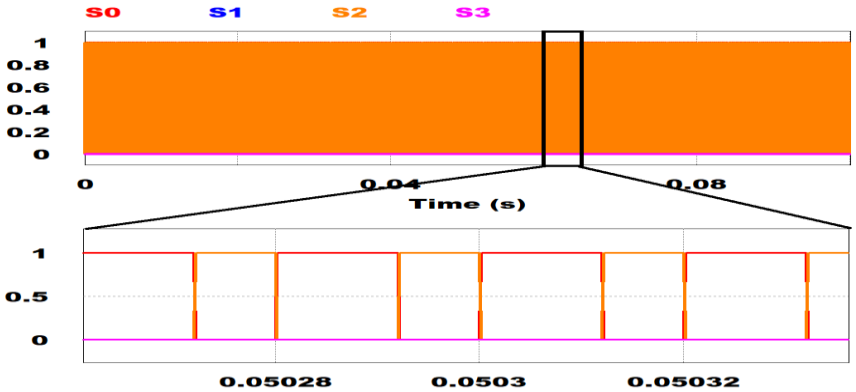
Fonte: Produção do próprio autor.

2.11.4 Conversor no modo 4 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a carga

Nesta operação, as chaves S_1 e S_3 ficam ambas com razão cíclica iguais a 0 e S_2 com Razão Cíclica igual a 1. Assim, a chave S_0 fica responsável por controlar a tensão de saída. Como o objetivo é manter a tensão de saída em 24 V, S_0 terá razão cíclica igual a 0,6.

A Figura 95 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s.

Figura 95 – Acionamento das chaves

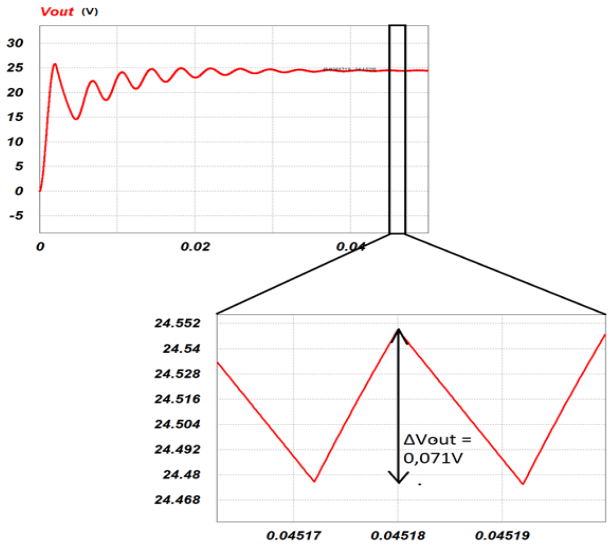


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 96 ilustra a curva de tensão de saída e seu ripple de 0,071 V, abaixo do valor limite usado para determinação do valor de capacitância, como descrito pelas equações (382). Usando a fórmula presente na equação (383) e para o valor de tensão de entrada do conversor sendo de 16,32 V nesse intervalo de tempo, o valor calculado

é 0,072 V. Assim, o valor obtido na simulação está dentro do valor proposto de capacitância para uma amplitude máxima de tensão de 0,12 V, como calculado no item 4.1.3.

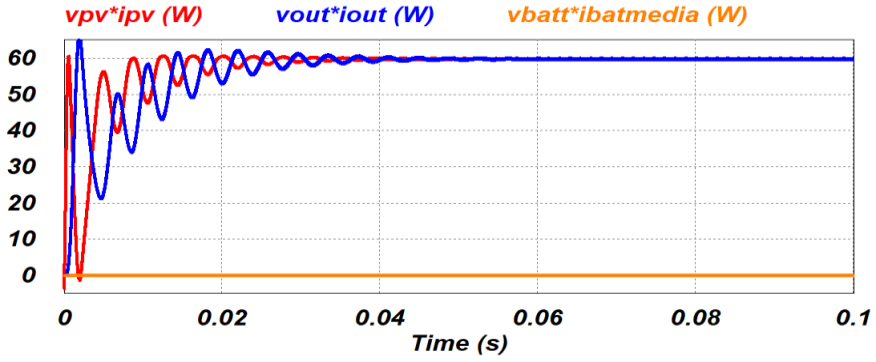
Figura 96 – Ripple da tensão de saída



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 97 ilustra as curvas de potência nas portas. Neste modo de operação, a potência do painel fotovoltaico é igual à da carga.

Figura 97 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja

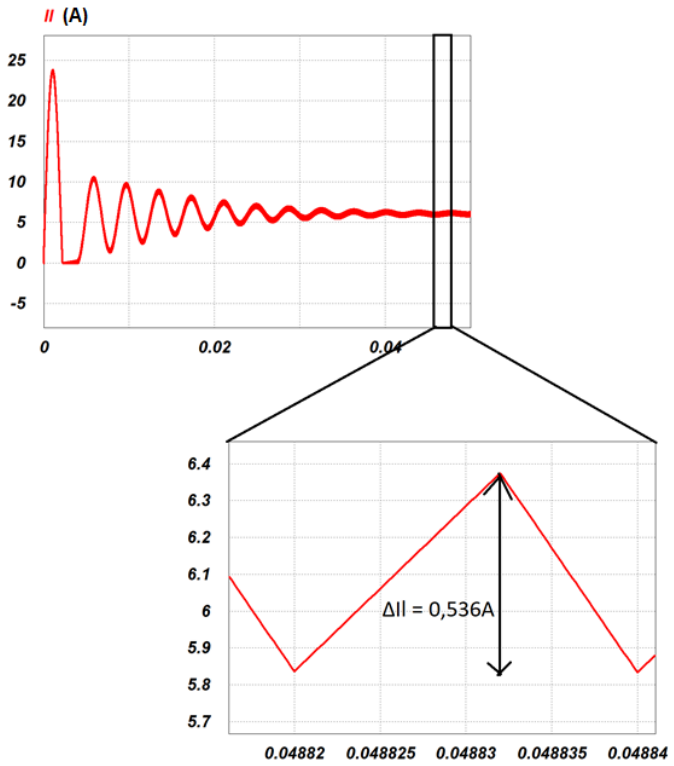


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 98 ilustra a curva da corrente no indutor com ripple de 0,536 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A calculado na equação (373). Considerando o valor calculado da equação (374), o valor obtido de 0,54 A para a

tensão de saída do conversor em 24 V. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2.

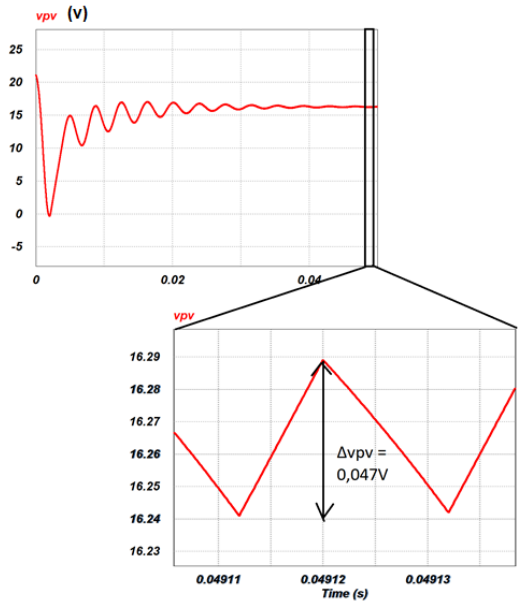
Figura 98 – Ripple na corrente no indutor



Fonte: Produção do próprio autor.

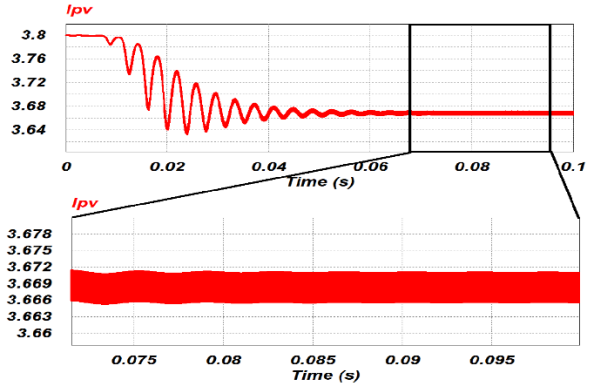
A Figura 99 ilustra a curva de tensão de entrada e seu ripple de 0,047 V, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 0,1055 V calculado na equação (369). Considerando o valor calculado da equação (370), o valor obtido de 0,048 A para um valor de corrente na entrada no regime permanente de 3,67 A, como ilustrado na Figura 100. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.1.

Figura 99 – Ripple da tensão de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 100 – Curva da corrente de entrada

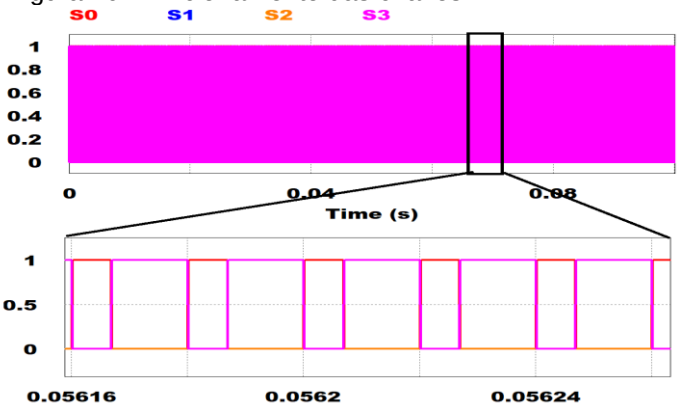


Fonte: Produção do próprio autor.

2.11.5 Conversor no modo 5 - fluxo de potência do painel fotovoltaico para a bateria

Nesta operação, as chaves S_1 e S_2 ficam ambas com razão cíclica iguais a 0 e S_3 com Razão Cíclica igual a 1. Assim, a chave S_0 fica responsável por controlar a tensão de saída. Como o objetivo é carregar a bateria e não há tensão de saída neste modo, S_0 pode ter qualquer valor. Neste caso, terá razão cíclica igual a 0,34. A Figura 101 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s.

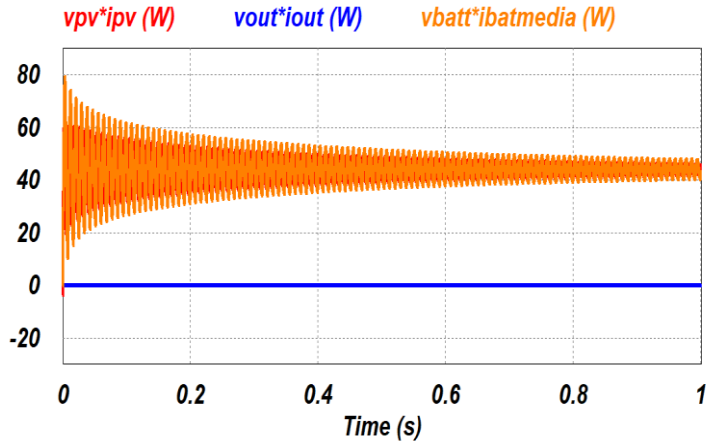
Figura 101 – Acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 102 ilustra as curvas de potência nas portas. Neste modo de operação, a potência do painel fotovoltaico é igual à da bateria.

Figura 102 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja

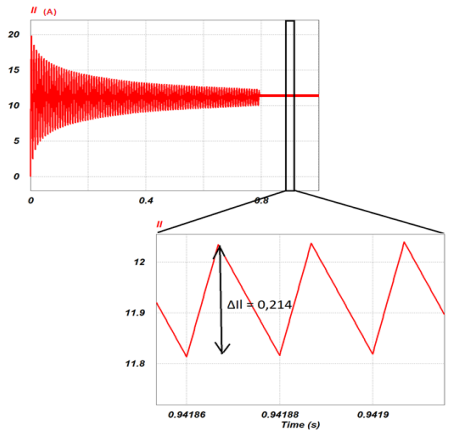


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 103 ilustra a curva da corrente no indutor com o ripple de 0,214 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A. calculado na equação (373). Considerando o valor calculado da equação (374), o valor obtido de 0,226 A. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2. A Figura 104 ilustra a curva de tensão de entrada e seu ripple de 0,08 V, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 0,1055 V calculado na equação (369). Considerando o valor calculado da equação (370), o valor obtido de 0,081 V para um valor de corrente na entrada no regime permanente de 3,79 A, como ilustrado na

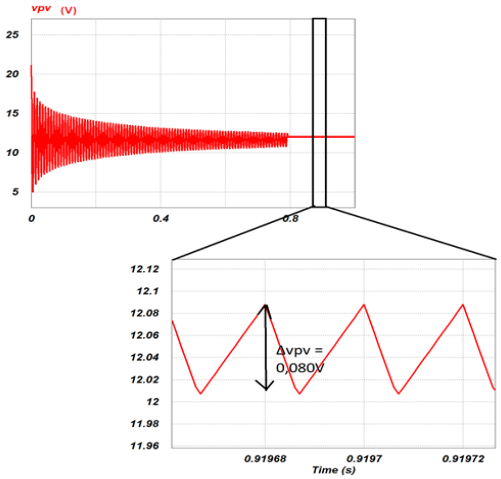
Figura 105. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.3.

Figura 103 – Ripple na corrente no indutor



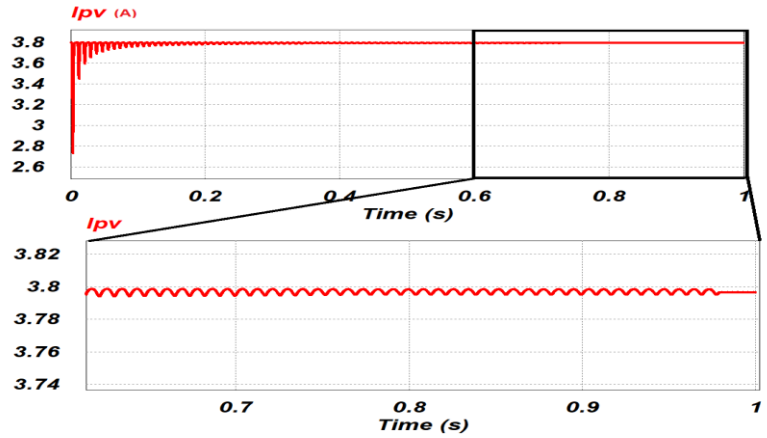
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 104 – Ripple da tensão de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

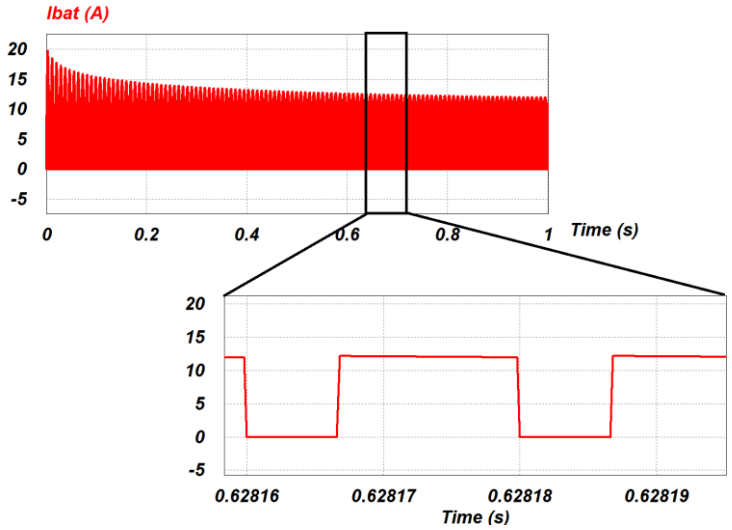
Figura 105 – Curva da corrente de entrada



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 106 ilustra a corrente pulsada da bateria, sendo negativa pois está fornecendo energia a carga.

Figura 106 – Forma de onda da corrente na bateria



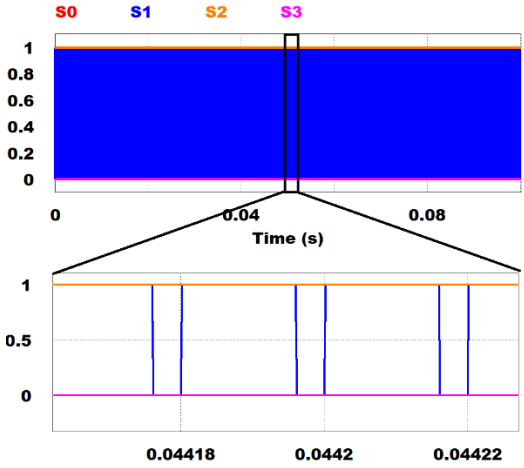
Fonte: Produção do próprio autor.

2.11.6 Conversor no modo 6 - fluxo de potência da bateria para a carga

Nesta operação, as chaves S_0 e S_3 ficam ambas com razão cíclica iguais a 0 e S_2 com Razão Cíclica igual a 1. Assim, a chave S_1 fica responsável por controlar a tensão de saída. Como o objetivo é manter a tensão de saída em 24 V, S_1 terá razão cíclica igual a 0,8.

A Figura 107 ilustra as razões cíclicas das chaves e seu acionamento no período T_s.

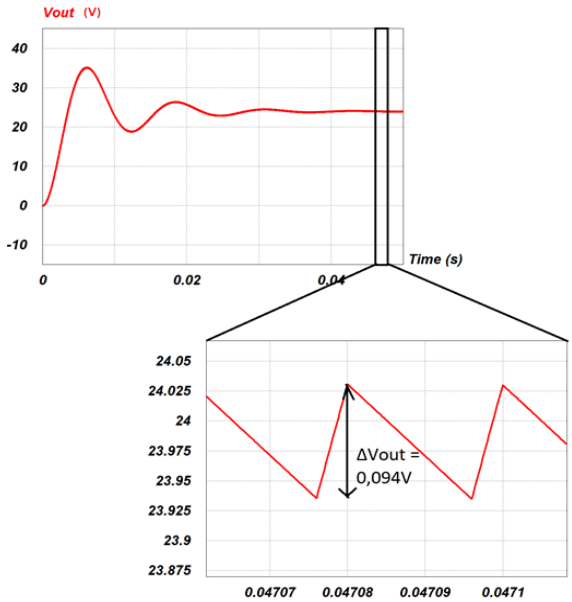
Figura 107 – Acionamento das chaves



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 108 ilustra a curva de tensão de saída e seu ripple de 0,094 V, abaixo do valor limite usado para determinação do valor de capacitância, como descrito pelas equações (383). Usando a fórmula presente na equação (384) e para o valor de tensão de saída do conversor sendo de 24 V nesse intervalo de tempo, o valor calculado é 0,096 V. Assim, o valor obtido na simulação está dentro do valor proposto de capacitância para uma amplitude máxima de tensão de 0,12 V, como calculado no item 4.1.3.

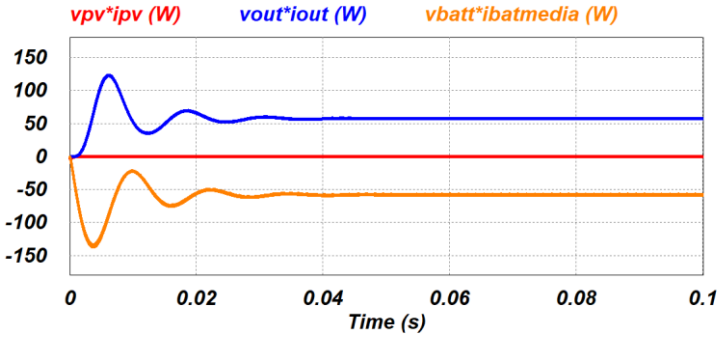
Figura 108 – Ripple da tensão de saída



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 109 ilustra as curvas de potência nas portas. Neste modo de operação, a potência da bateria é igual à da carga.

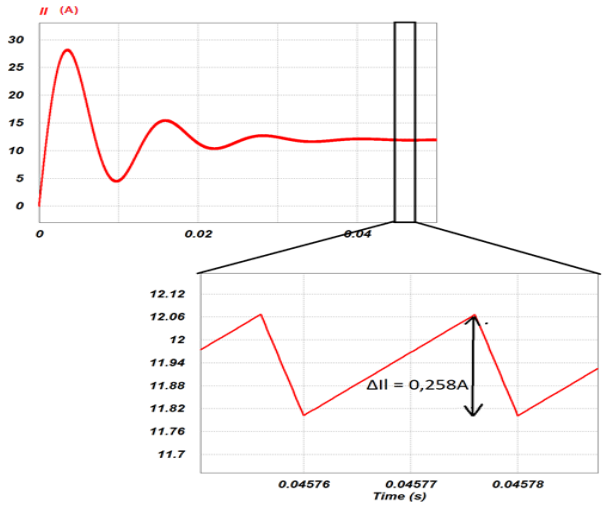
Figura 109 – Potência do painel fotovoltaico em vermelho, potência na carga em azul e potência média na bateria em laranja



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 110 ilustra a curva da corrente no indutor com o ripple de 0,258 A, que está dentro do especificado de um ripple máximo de 1,324 A. calculado na equação (373). Considerando o valor calculado da equação (374), o valor obtido de 0,264 A. Deste modo, o valor obtido na simulação está em acordo com o calculado no item 4.1.2.

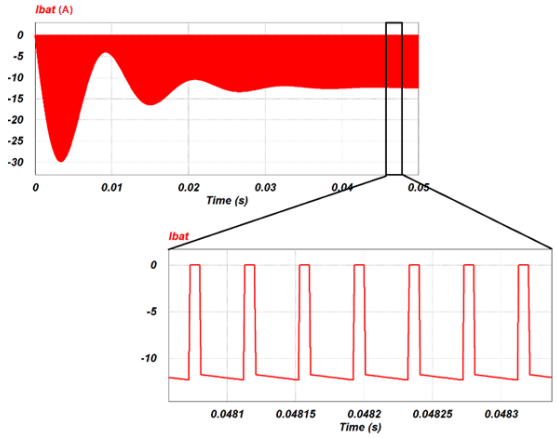
Figura 110 – Ripple na corrente no indutor



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 111 ilustra a curva de corrente na bateria. A corrente é pulsada, com valor de pico de aproximadamente -11 A. Como é negativa, a bateria está sendo usada para carregar o indutor.

Figura 111 – Corrente de saída da bateria



Fonte: Produção do próprio autor.

3 CONCLUSÃO

Neste projeto de graduação foi apresentado um conversor três portas aplicado para sistemas fotovoltaicos. O grande potencial do conversor estudado e proposto é o sistema integrado de gerenciamento centralizado do fluxo de potência entre os elementos conectados nas portas. O conversor proposto é obtido a partir de uma adaptação de uma topologia existente, garantindo todas as cinco possibilidades de fluxo de potência da relação carga, painel fotovoltaico e bateria. Nele, foram abordados todos os seis modos de operação, os equacionamentos das correntes e tensões nas chaves e componentes passivos e o funcionamento do conversor. Ao final, foram feitas simulações das três operações dos conversores, comprovando o gerenciamento do fluxo de energia entre as portas com somente uma chave. É observado que controles podem ser aplicados no conversor como algoritmos de rastreamento de máxima potência e malha fechada de tensão de saída.

Comparando-se com a topologia inicial proposta por Feng, Yang, Zerong e Zhu (2018), a topologia modificada apresenta vantagens. A adição de um diodo em série com a chave S_0 permite um caminho unidirecional de tensão para o painel fotovoltaico, eliminando a restrição que a tensão do painel fotovoltaico precisa ser maior que a tensão da bateria. Isto garante maior gama de operação de tensões. A inserção de uma chave *mosfet* junto de um diodo em série junto ao negativo da bateria possibilita o carregamento da bateria separado da carga. Assim, é possível obter tensões menores no modo em que o painel fotovoltaico carrega tanto a bateria quando a carga e cria uma possibilidade da bateria ser carregada pelo painel quando não houver carga. Assim, as modificações propostas tornam possível o conversor operar nos cinco modos possíveis da combinação painel fotovoltaico, bateria e carga além de garantir maior gama de operação da tensão de saída e do painel fotovoltaico, eliminando a restrição original que o painel fotovoltaico precisaria ter tensão maior do que a bateria. Uma possível desvantagem é a maior quantidade de semicondutores do que o circuito original, que poderá gerar mais perdas e uma possível redução da eficiência do conversor. A bateria ser carregada e descarregada por corrente pulsada pode reduzir a vida útil da mesma.

Para trabalhos futuros na topologia proposta neste trabalho as possibilidades são: a análise do conversor em modo de condução descontínua, a implementação de um sistema de malha fechada para controlar a tensão de saída e a implementação de rastreamento de máxima potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, Y; WEN, G.; PENG, L; KANG, Y.; CHEN, J. A family of cost-efficient nonisolated single-inductor three-port converters for low power stand-alone renewable power applications. *In*: APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC), 18., 2013, Long Beach. **Anais [...].** Long Beach: IEEE, 2013. p. 1083-1088.

CHENG, T.; LU, D. D. C.; GONG, A.; VERSTRAETE, D. Analysis of a three-port DC-DC converter for PV-battery system using DISO boost and SISO buck converters. *In:* AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (AUPEC), 2015, Wollongong. **Anais [...]**. Wollongong: IEEE, 2015. p. 1-6.

FENG, P.; YANG, P.; ZERONG, S.;ZHU. Topology Derivation of Non-isolated Multi-Port DC-DC Converters Based on H-Bridge. *In:* SOUTHERN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (SPEC), 4., 2018, Singapura. **Anais [...].** Singapura: IEEE, 2018. p. 1-7.

TAO, H.; KOTSOPOULOS, A; DUARTE, J. L.; HENDRIX, M. A. M. Family of multiport bidirectional DC-DC converters. **IEEE Proceedings - Electric Power Applications**, [s. l.], v. 153, n. 3, p. 451-458, 2006.

VÁZQUEZ, N.; SANCHEZ, C. M.; HERNANDEZ, C.; VÁZQUEZ, E.; GARCIA, L. d. C.; ARAU, J. A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System. **International Journal of Photoenergy**, [s. l.], p.1-13, 2014.

ZHANG, P; CHEN, Y; KANG, Y. Nonisolated Wide Operation Range Three-Port Converters With Variable Structures. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 854-869, 2017.

ZHANG, N; SUTANTO, D; MUTTAQI, K. M. A review of topologies of three-port DC–DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], n. 56. p. 388-401, 2016.

ZHOUL, Z.; WUL, H.; MA, X.; XINGL, V. A non-isolated three-port converter for stand-alone renewable power system. *In:* ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 38., 2012, Montreal. **Anais [...]**. Montreal: IEEE, 2012. p. 3352-3357.