

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO
DE PEQUENOS EQUIPAMENTOS EM CORRENTE CONTÍNUA**

FELINTO SÉRGIO FIRMEZA E SILVA

Fortaleza

Junho 2010

FELINTO SÉRGIO FIRMEZA E SILVA

**SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO
DE PEQUENOS EQUIPAMENTOS EM CORRENTE CONTÍNUA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre.

Prof. PhD Fernando Luiz Marcelo Antunes –
Orientador

Fortaleza

Junho 2010

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE PEQUENOS EQUIPAMENTOS EM CORRENTE CONTÍNUA

Por

FELINTO SÉRGIO FIRMEZA E SILVA

Dissertação de mestrado aprovada para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, pela
Banca examinadora formada por:

Presidente: Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD – Orientador.
Universidade Federal do Ceará

Membro: Prof. Sérgio Daher, Dr.-Ing.
Universidade Federal do Ceará

Membro: Prof. René Pastor Torrico Bascopé, Dr.
Universidade Federal do Ceará

Membro: Prof. Edilson Mineiro Sá Júnior, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Membro: Prof. Hélio Leães Hey, Dr.
Universidade Federal de Santa Maria

Fortaleza, 22 de junho de 2010

A Deus,

Aos meus pais Maria Lilia e José Nivaldo,

À minha avó Maria de Lourdes †,

Aos meus irmãos Felipe César e José Nivaldo,

À minha esposa Silvia Noeli.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu infinito amor.

Aos meus queridos pais e familiares por me incentivarem e valorizarem meu trabalho.

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CEPISA (Companhia Energética do Piauí) que contribuíram com apoio financeiro necessário à realização desse trabalho e desenvolvimento científico.

Ao Prof. Fernando Antunes, por sua orientação, amizade, competência, apoio, exemplos de vida, sabedoria e valiosos ensinamentos. Agradeço também a confiança em mim depositada para o desenvolvimento de um sistema desse porte.

Aos meus colegas de projeto Sergio Daher, Edilson Mineiro, Alisson Freitas, Saulo Ximenes e Sarah Kamila que ajudaram com bastante dedicação durante o período de elaboração e implementação do projeto. Agradecimento especial ao Alisson Freitas por me ajudar nos momentos em que eu não estava presente em Fortaleza por motivo de trabalho.

Aos professores José Carlos, Cícero Marcos, Luiz Henrique, Demercil Oliveira, René Bascope e a todos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, responsáveis diretamente pela minha formação no programa de Mestrado.

Aos meus colegas de mestrado Samuel Jó, Roque Júnior, Daniel Lima, Livia, Hermínio Miguel, Ranoyca Nayana, Antônio Barbosa, Venício e a todos os amigos que por motivo de esquecimento não foram citados.

Aos meus colegas de trabalho (IFPI – Campus Picos) que me incentivaram para a realização do feito.

Aos professores Hélio Leaes, René Torrico, Sérgio Daher e Edilson Mineiro por contribuírem com sugestões para aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

Resumo da dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE PEQUENOS EQUIPAMENTOS EM CORRENTE CONTÍNUA

FELINTO SÉRGIO FIRMEZA E SILVA

Orientador: Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

Palavras-chaves: Sistemas fotovoltaicos isolados, eletrificação rural, carregador de baterias, conversor elevador.

Número de páginas: 89 Páginas.

RESUMO: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para alimentar cargas em corrente contínua, sendo aplicado para suprir com energia elétrica uma escola rural típica do estado do Piauí. O sistema composto por painel fotovoltaico, banco de baterias, carregador do banco de baterias e conversor CC/CC elevador para alimentar as cargas em corrente contínua, foi projetado para suprir a escola por dois dias, mesmo em condições mínimas de radiação solar. A energia solar é convertida em energia elétrica pelo painel solar e armazenada em um banco de baterias do tipo estacionária de chumbo ácido. O carregador de baterias possibilita a carga das mesmas no ponto de máxima potência (MPP) do painel. A topologia escolhida para o carregador foi um boost intercalado, a qual seu funcionamento pode ser comparado a dois conversores boost clássicos, trabalhando em paralelo, com defasamento de 180° entre os comandos dos interruptores. A carga é suprida através de um conversor CC/CC elevador de alto ganho. O projeto completo do sistema e seu controle são expostos. Finalmente são apresentados os resultados de simulação e os principais resultados experimentais do protótipo montado em laboratório e instalado em campo.

Abstract of dissertation presented at University Federal of Ceará as partial of fulfillment of the requirements for the Master degree of in Electrical Engineering.

PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR LIGHTING AND SUPPLY SMALL EQUIPMENT IN DIRECT CURRENT

FELINTO SÉRGIO FIRMEZA E SILVA

Advisor: Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

Keywords: Isolated PV system, rural electrification, battery charger, High gain boost converter.

Number of pages: 89 Pages.

ABSTRACT: This work presents the development of a photovoltaic system (PV) to supply electricity in DC voltage to household appliances in rural areas. The system consists of photovoltaic panel, battery bank, battery charger and a boost converter. The system was designed to support two days of autonomy, even under conditions of minimal solar radiation. The solar energy is captured by PV panels and stored in a lead acid batterie bank. The battery charger enables the charge of the batteries on maximum power point (MPP) of the PV panel. The chosen topology for the charger was a boost interleaved, which operation can be compared with two classic boost converters working in parallel, with 180° phase shift between the controls of the switches. The load is supplied through a high gain boost converter. The complete design of the system and its control are presented. Finally, the simulation results and the main experimental results obtained from a laboratory prototype and from a prototype in operation in rural school are shown.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Simbologia	xiv
Acrônimos e Abreviaturas	xvii
CAPÍTULO - 1 Introdução Geral	1
CAPÍTULO - 2 Sistemas Fotovoltaicos e o Sistema Proposto	5
2.1 <i>Sistemas Fotovoltaicos</i>	5
2.1.1 Configuração de Sistemas Isolados.....	7
2.2 <i>O Sistema Proposto</i>	11
2.2.1 Operação do Sistema.....	11
2.2.2 Local Escolhido Para Instalação do Protótipo	12
2.2.3 Regulamentação e Estudo de Carga	13
2.2.4 Os Conversores	15
2.2.5 Dimensionamento do Sistema	17
2.2.6 O Sistema Completo.....	21
2.3 <i>Considerações Finais</i>	21
CAPÍTULO - 3 O Carregador de Baterias	23
3.1 <i>Circuito Básico do Carregador de Baterias</i>	23
3.2 <i>Etapas de Funcionamento do Carregador de Baterias</i>	24
3.3 <i>Formas de Onda do Carregador de Baterias</i>	26
3.4 <i>Equacionamento do Carregador de Baterias</i>	27

3.4.1	Característica de Transferência Estática do Carregador de Baterias	29
3.4.2	Filtro de Entrada do Carregador de Baterias	29
3.4.3	Filtro de Saída do Carregador de Baterias.....	31
3.5	<i>Dimensionamento e Simulação do Carregador de Baterias</i>	32
3.6	<i>Controle do Carregador de Baterias</i>	38
3.7	<i>Considerações Finais</i>	40
CAPÍTULO - 4 O Conversor Elevador		42
4.1	<i>Seleção da Topologia do Conversor Elevador</i>	42
4.2	<i>Circuito Básico do Conversor Elevador</i>	45
4.3	<i>Etapas de Funcionamento do Conversor Elevador</i>	45
4.4	<i>Formas de Onda do Conversor Elevador</i>	47
4.5	<i>Equacionamento do Conversor Elevador</i>	49
4.5.1	Relação de Transformação	49
4.5.2	Indutâncias do Conversor Elevador	50
4.5.3	Filtro Capacitivo do Conversor Elevador.....	53
4.6	<i>Dimensionamento e Simulação do Conversor Elevador</i>	53
4.7	<i>Considerações Finais</i>	58
CAPÍTULO - 5 Resultados Experimentais		60
5.1	<i>O Protótipo</i>	61
5.1.1	Carregador de Baterias	62
5.1.2	Conversor Elevador.....	63
5.2	<i>Resultados Experimentais</i>	64

5.2.1 Resultados do Carregador de Baterias.....	64
5.2.2 Resultados do Conversor Elevador	67
5.2.3 O Sistema Completo.....	70
5.3 <i>Considerações Finais</i>	72
Conclusão Geral	73
Referências	76
APÊNDICE A	80
APÊNDICE B	86
APÊNDICE C	88

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Distribuição dos domicílios rurais não atendidos pela rede elétrica.	1
Figura 2.1 – Sistema em corrente contínua direta.	7
Figura 2.2 – Sistema em corrente alternada.....	8
Figura 2.3 – Sistema em corrente contínua com conversor CC/CC elevador de tensão de alto ganho.....	9
Figura 2.4 – Diagrama de blocos do sistema proposto.....	11
Figura 2.5 – Fotografias da escola.	12
Figura 2.6 – Topologia do carregador de baterias.	16
Figura 2.7 – Topologia do conversor elevador.	17
Figura 3.1 – Carregador de baterias.	24
Figura 3.2 – Etapas de funcionamento do conversor boost intercalado.....	25
Figura 3.3 – Principais formas de onda do carregador de baterias.	27
Figura 3.4 – Carregador de baterias.	28
Figura 3.5 – Topologia do conversor boost clássico.	28
Figura 3.6 – Apresentação gráfica da característica de transferência do conversor boost.	29
Figura 3.7 – Conversor boost com capacitor de entrada.	30
Figura 3.8 – Ondulação de corrente e tensão no capacitor de saída.	31
Figura 3.9 – Circuito de simulação do carregador de baterias.....	34
Figura 3.10 – Tensão sobre os interruptores S1 e S2.	35
Figura 3.11 – Entrada em condução e bloqueio do interruptor S1.	35
Figura 3.12 – Entrada em condução e bloqueio do interruptor S2.	36
Figura 3.13 – Corrente nos indutores L1 e L2.	37

Figura 3.14 – Tensão na saída do conversor elevador.	38
Figura 3.15 – Detalhe da ondulação da tensão na saída do conversor elevador.	38
Figura 3.16 – Fluxograma da rotina de proteção do MPP.	39
Figura 3.17 – Fluxograma da rotina padrão do MPPT.	40
Figura 4.1 – Topologias não isoladas, modificadas e de alto ganho.....	44
Figura 4.2 – Conversor boost de alto ganho com grampeador.....	45
Figura 4.3 – Circuito completo e simplificado do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	46
Figura 4.4 – Etapas de funcionamento do conversor elevador.....	47
Figura 4.5 – Principais formas de onda para o circuito básico do conversor elevador. ..	48
Figura 4.6 – Etapas de funcionamento do conversor elevador.....	49
Figura 4.7 – Forma de onda da corrente I_{Lm} do modelo equivalente.	51
Figura 4.8 – Circuito de simulação do conversor elevador.....	55
Figura 4.9 – Tensão sobre o interruptor.....	56
Figura 4.10 – Entrada em condução do interruptor do conversor elevador.....	56
Figura 4.11 – Bloqueio do interruptor do conversor elevador.	57
Figura 4.12 – Tensão na saída do conversor elevador.	57
Figura 4.13 – Detalhe da ondulação da tensão na saída do conversor elevador	58
Figura 4.14 – Corrente na saída do conversor elevador.	58
Figura 5.1 – Esquema do circuito de potência do sistema proposto.....	60
Figura 5.2 – Esquema do circuito de potência do carregador de baterias.	62
Figura 5.3 – Fotografia do carregador de baterias.	62
Figura 5.4 – Esquema do circuito de potência do conversor elevador.	63
Figura 5.5 – Fotografia do conversor elevador.	63
Figura 5.6 – Tensão na entrada do carregador de baterias (10 V/div; 10 μ s/div) e corrente na entrada do carregador de baterias (10 A/div; 10 μ s/div).....	64

Figura 5.7 – Tensão na entrada do carregador de baterias (10 V/div; 10μs/div) e tensão na saída do Carregador de baterias (10 V/div; 10μs/div).....	65
Figura 5.8 – Tensão no interruptor S1 (10 V/div; 10μs/div) e corrente no indutor L1 (5 A/div; 10μs/div).....	65
Figura 5.9 – Tensão na saída do carregador de baterias (10 V/div; 10μs/div) e corrente na saída do carregador de baterias (10 A/div; 10μs/div).....	66
Figura 5.10 – Curva de rendimento do carregador de baterias.	66
Figura 5.11 – Tensão na entrada do conversor elevador (10 V/div; 200ns/div) e corrente na entrada do conversor elevador (10 A/div; 200ns/div).....	67
Figura 5.12 – Tensão no interruptor S3 (20 V/div; 20μs/div) e corrente no indutor L3 (10 A/div; 20μs/div).....	68
Figura 5.13 – Corrente no primário do indutor acoplado do conversor elevador (10 A/div; 20μs/div) e corrente no secundário do indutor acoplado do conversor elevador (10 A/div; 20μs/div).....	68
Figura 5.14 – Tensão na saída do conversor elevador (100 V/div; 20μs/div) e corrente na saída do conversor elevador (1 A/div; 20μs/div).....	69
Figura 5.15 – Curva de rendimento do conversor elevador.	69
Figura 5.16 – Estrutura para receber o sistema fotovoltaico.	70
Figura 5.17 – Painéis fotovoltaicos.	70
Figura 5.18 – Sistema completo instalado.	71
Figura 5.19 – Funcionamento do sistema.	71

Simbologia

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADE
A_{hd}	Capacidade fornecida pelo módulo fotovoltaico em um dia	Ah
A_{hL}	Consumo diário do sistema	Ah
C	Capacitância do capacitor de filtro	F
C_{bat}	Capacidade total das baterias	Ah
C_g	Capacitor grampeador	F
C_{IN}	Capacitor paralelo com o painel fotovoltaico	F
C_o	Capacitor de filtro	F
d	Dias de autonomia do sistema	Dias
D	Ciclo de trabalho	-
$D1$	Diodo boost 1	-
$D2$	Diodo boost 2	-
DC	Profundidade de descarga	%
D_{CB}	Ciclo de trabalho do carregador de baterias	-
D_{CE}	Ciclo de trabalho do conversor elevador	-
Dg	Diogo grampeador	-
f_{CB}	Frequência de operação do carregador de baterias	Hz
f_{CE}	Frequência de operação do conversor elevador	Hz
F_{CH}	Frequência de operação do conversor	Hz
I_0	Corrente na saída do conversor	A
I_{C0}	Corrente no capacitor de filtro	A
I_{CBIN}	Corrente de entrada no carregador de baterias	A
I_{CEIN}	Corrente na entrada do conversor elevador	A
I_{D1}	Corrente do diodo D1	A
I_{D2}	Corrente do diodo D2	A
I_{IN}	Corrente na entrada do conversor	A
I_{L1}	Corrente no indutor L1	A
I_{L2}	Corrente no indutor L2	A
I_{rs}	Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico	A
K	Relação de transformação do transformador ideal	-

$L1$	Indutor de filtro 1	H
$L2$	Indutor de filtro 2	H
$N1$	Número de espiras do indutor L1	-
$N2$	Número de espiras do indutor L2	-
NP	Número mínimo de painéis fotovoltaicos	-
P_{BAT}	Energia diária corrigida	Watt
P_{CBOUT}	Potência na saída do carregador de baterias	W
P_{CEOUT}	Potência na saída do conversor elevador	W
P_{OUT}	Potência consumida pela carga	Watt
R_{med}	Radiação diária em Uruçuí	W/m ² /dia
R_S	Radiação solar padrão	W/m ² /dia
T	Período de operação do conversor	S
t_{func}	Tempo de funcionamento diário	h/dia
V_{bat}	Tensão no banco de baterias	V
V_{CBIN}	Tensão de entrada no carregador de baterias	V
V_{CBOUT}	Tensão na saída do carregador de baterias	V
V_{CC}	Tensão no barramento das baterias	Volt
V_{CEIN}	Tensão na entrada no conversor elevador	V
V_{CEOUT}	Tensão na saída no conversor elevador	V
V_{CM}	Tensão máxima no capacitor de filtro	V
V_{cm}	Tensão mínima no capacitor de filtro	V
V_{IN}	Tensão na entrada do conversor	V
V_{OUT}	Tensão na saída do conversor	V
ΔI_{CBIN}	Ondulação de corrente na entrada do carregador de baterias	A
ΔI_{CE}	Ondulação de corrente na entrada no conversor elevador	A
ΔI_{IN}	Variação da corrente na entrada do conversor	A
ΔI_{Lm}	Variação de corrente no indutor L1 do conversor elevador	A
ΔV_{CO}	Variação da tensão no capacitor de filtro	V
ΔV_{CBIN}	Ondulação de tensão na entrada do carregador de baterias	V
ΔV_{CBOUT}	Ondulação de tensão na saída do carregador de baterias	V
ΔV_{CEIN}	Ondulação de tensão na entrada do conversor elevador	V
ΔV_{CEOUT}	Ondulação de tensão na saída do conversor elevador	V
ΔV_{IN}	Variação da tensão na entrada do conversor	V

η_{bat}	Eficiência da bateria	-
η_{CB}	Rendimento para o carregador de baterias	%
η_{CE}	Rendimento para o conversor elevador	%

Acrônimos e Abreviaturas

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
AD	Analógico-digital
ANEEL	Agência nacional de engenharia elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEPEL	Centro de pesquisas de energia elétrica
CFCB	Centros fotovoltaicos de carregamento de baterias
COPEL	Companhia paranaense de energia
DOE	Department of energy
DVD	Disco versátil digital
HSP	Horas de sol pleno
LCD	Display de cristal líquido
MPP	Ponto de máxima potência
NASA	National aeronautics and space administration
NREL	National renewable energy laboratory
PBE	Programa brasileiro de etiquetagem
SFD	Sistema fotovoltaico domiciliar
SIGFI	Sistemas individuais de geração de energia elétrica com fontes intermitentes
TV	Televisor
MCC	Modo de condução contínua

CAPÍTULO 1

1 Introdução Geral

Existe hoje cerca de dois milhões de domicílios rurais não atendidos pelo sistema elétrico brasileiro, o que corresponde a 80% do total nacional da exclusão elétrica. Considerando que cada domicílio tem em média cinco pessoas, cerca de 10 milhões de brasileiros vivem no meio rural sem acesso a esse serviço público. Cerca de 90% dessas famílias possuem renda mensal inferior a três salários mínimos [1].

A Figura 1.1 apresenta a situação da distribuição dos domicílios rurais não atendidos pela rede elétrica nas cinco regiões do Brasil. Observa-se que as mais carentes, no que se diz respeito ao fornecimento de energia elétrica, são as regiões Norte e Nordeste. Entretanto, o grande problema quanto à distribuição de energia elétrica não está na falta de energia para consumo, e sim na sua distribuição, haja vista que os domicílios sem o fornecimento de energia estão situados em locais de difícil acesso, distantes do sistema de distribuição convencional e geralmente concentrados em pequenas quantidades de consumidores.

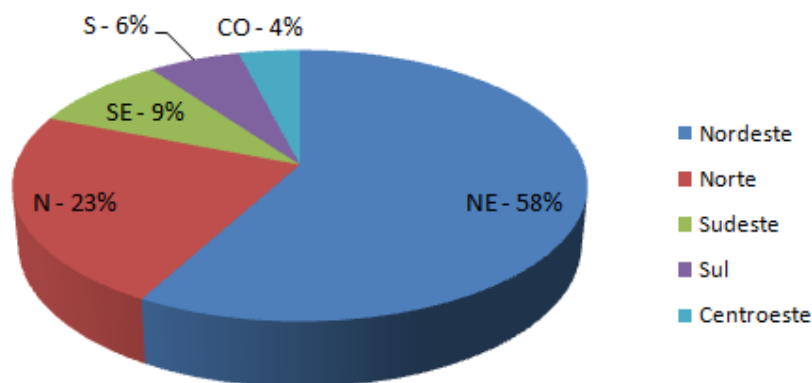


Figura 1.1 - Distribuição dos domicílios rurais não atendidos pela rede elétrica.

Pensando no problema de fornecimento de energia elétrica para as famílias do meio rural, o governo federal desenvolveu programas que visam suprimir a carência das comunidades isoladas. Um exemplo desses programas é o Decreto nº. 4.873, que em 11 de novembro de 2003, instituiu o programa LUZ PARA TODOS, com o objetivo de proporcionar, até o final do ano de 2008, o atendimento com energia elétrica à parcela da população do meio rural brasileiro que ainda não tem acesso a esse tipo de serviço. Entretanto, durante a execução do programa, foram localizadas novas famílias sem fornecimento de energia elétrica e em função do aumento da demanda, o programa LUZ PARA TODOS, através do Decreto nº. 6.442, de 25 de abril de 2008, foi prorrogado para ser concluído até o ano de 2010 [1],[2],[3].

Estão inseridos no programa do Governo Federal, os Governos Estaduais e as concessionárias de energia elétrica. As concessionárias, quando solicitado uma nova ligação, deverão fornecer energia elétrica sem acarretar ônus para o consumidor quando seu consumo mensal não exceder 50 kW/mês e observando as metas estabelecidas no Plano de Universalização de Energia Elétrica da Concessionária. Segundo o regimento do programa LUZ PARA TODOS, o atendimento da demanda no meio rural deve ser realizado mediante três possibilidades: extensão da rede elétrica, criação de sistemas de geração descentralizada com redes isoladas ou sistemas individuais [4].

Atualmente muitos consumidores já foram contemplados com o programa. Grande parte do fornecimento da energia elétrica foi realizado mediante a extensão da rede convencional. Entretanto, esse método de fornecimento e a criação de gerações descentralizadas tornam-se menos atrativas e economicamente inviáveis para os casos onde as comunidades rurais isoladas encontram-se distantes da rede elétrica, isso somado a baixa demanda e à baixa densidade demográfica.

Para os casos de comunidades isoladas os sistemas individuais têm se mostrado bastante atrativos [4],[5],[6],[7] mesmo com preço inicial mais elevado quando comparado a outras formas de geração de energia elétrica.

O custo de um sistema fotovoltaico está amplamente ligado com o que é considerado custo e o que é considerado benefício. Tomando-se os preços de mercado e o ciclo de vida de um sistema fotovoltaico, o custo da eletricidade gerada por um sistema individual pode ficar em torno de 3 a 6 R\$/kWh [8]. Este custo tem sido fator limitante no uso de sistemas fotovoltaicos em comparação com custos de energia de origem hidráulica, nuclear ou fóssil. Considerando, entretanto, as dificuldades que hoje se impõem na construção de novas usinas geradoras, as dificuldades e custo na construção de novas linhas de transmissão e distribuição, custo e dificuldade de acesso a comunidades isoladas, a energia elétrica oriunda de sistemas fotovoltaicos já pode ser considerada economicamente viável.

Outros fatores vêm a melhorar ainda a relação custo benefício quanto ao investimento em tecnologias para uso de energia fotovoltaica. Dentre estes fatores pode ser destacado o desenvolvimento de uma tecnologia nacional em sistemas fotovoltaicos. Atualmente há uma predominância de equipamentos importados, principalmente da Alemanha. Levando-se em conta custos de importação que são evitados, os sistemas fotovoltaicos tornam-se ainda mais viáveis.

Neste contexto propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para comunidades isoladas no intuito de produzir energia elétrica armazenando-a em baterias e fornecendo-a para iluminação de ambientes e alimentação de pequenos equipamentos em corrente contínua [8],[9],[10]. O sistema será projetado com capacidade de alimentar residências ou pequenas escolas rurais com potência instalada de até 30 kWh e atenderá, quanto à capacidade e autonomia de operação, às resoluções normativas e autorizativas da ANEEL.

Uma breve síntese do trabalho é apresentada a seguir:

O segundo capítulo tem início com o estudo de sistemas fotovoltaicos, assim como as principais configurações instaladas no Brasil. Neste capítulo também será apresentado o sistema proposto com seu dimensionamento de acordo com as normas regulamentadoras e autorizativas da ANEEL [4].

O terceiro capítulo apresenta o estudo teórico do conversor responsável pelo carregamento do banco de baterias (denominado carregador de baterias). Serão apresentados princípio de funcionamento, equacionamento, projeto, simulação e controle. O controle deve garantir que o painel fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, assim garantindo que seja extraída a sua máxima potência para qualquer nível de radiação solar.

O quarto capítulo apresenta o foco principal do trabalho que é um conversor capaz de alimentar cargas residenciais (TV LCD, DVD, rádio, etc..) operando em corrente contínua. Para isso os eletrodomésticos devem possuir um estágio de retificação interna na sua entrada. Serão apresentados seu princípio de funcionamento, equacionamento, projeto e simulação.

No capítulo cinco são apresentados os resultados experimentais para os dois protótipos implementados, assim, verificando e comprovando os estudos teóricos realizados nos capítulos anteriores.

Ao fim do trabalho descreve-se a conclusão geral acerca de todo o estudo, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 Sistemas Fotovoltaicos e o Sistema Proposto

O presente capítulo tem início com um breve estudo sobre sistemas fotovoltaicos domiciliares – SFD, apresentando suas principais configurações utilizadas no mundo. Em seguida será apresentado o sistema proposto para este trabalho. O sistema tem objetivo de suprir com energia elétrica uma residência ou escola rural, atendendo a Resolução Normativa de nº. 83, de 20 de setembro de 2004 e a Resolução Autorizativa nº. 927 de 29 de maio de 2007 – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), quantos aos critérios de autonomia no fornecimento de energia elétrica [11],[12].

O sistema proposto apresenta um novo modelo de alimentação para localidades rurais, onde a mesma é realizada em corrente contínua e é capaz de alimentar a grande maioria dos equipamentos comuns que seriam utilizados em sistemas com corrente alternada. Basta que os mesmos possuam um retificador em seu estágio de entrada e que seus diodos suportem a corrente de alimentação do equipamento.

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são sistemas de energia elétrica que convertem a luz emitida pelo sol em energia elétrica de forma limpa e confiável sem consumo de combustível fóssil, líquido ou gasoso. A conversão ocorre no painel fotovoltaico e é resultado do movimento de elétrons entre as bandas de valência e condução gerando uma diferença de potencial e dando origem a uma corrente elétrica. Maiores informações sobre painéis fotovoltaicos podem ser encontradas em [4],[6],[7],[13],[19].

A energia elétrica fornecida pelo painel é armazenada em baterias sobre supervisão do controlador de carga. Na grande maioria dos casos para que essa energia armazenada seja consumida necessita-se de um circuito inversor o qual tem a função de converter corrente contínua em corrente alternada. Dessa forma os sistemas fotovoltaicos são constituídos basicamente por;

Painel fotovoltaico – Elemento responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica.

Controlador de carga – Dispositivo eletrônico capaz de realizar a adaptação do painel fotovoltaico ao banco de baterias controlando o carregamento da mesma.

Bateria – Dispositivo que acumula a energia disponibilizada pelo painel fotovoltaico na forma química, por esse motivo, também chamada de acumuladores de corrente.

Inversor – Dispositivo eletrônico capaz de converter corrente contínua em corrente alternada.

Os sistemas fotovoltaicos possuem vantagens e desvantagens quando comparados a outras formas de geração de energia elétrica. Pode-se citar como vantagem; durabilidade, baixo custo de manutenção, custo zero com combustíveis, descentralização da rede elétrica e redução da poluição ambiental. Entretanto, possui desvantagem de alto custo inicial, potência instantânea do sistema pode sofrer oscilação devida variações da radiação solar disponível, necessitam de acumuladores (no caso dos isolados), necessita de conscientização e treinamento do usuário, etc.

As primeiras utilizações de sistemas fotovoltaicos foram em satélites e sondas espaciais. Em março de 1958, embora não convicta das vantagens da utilização de painéis solares, a NASA lançou o primeiro satélite que utilizava energia solar, o Vanguard I. Desde então a utilização vem aumentando gradativamente [14],[15].

No Brasil os primeiros sistemas fotovoltaicos que visam atender domicílios foram implantados no final de 1992 através de um projeto de cooperação internacional CEPEL/DOE/NREL [16].

Os sistemas fotovoltaicos possuem duas configurações: sistemas interligados a rede e sistemas isolados. Os sistemas interligados a rede ainda são pouco utilizados no Brasil devido à falta de programas de incentivo por parte do governo e elevado custo quando comparado a outras formas de geração de energia elétrica (hidráulica, térmica, etc.). Os sistemas isolados, foco desse trabalho, são utilizados em locais onde a extensão da rede elétrica convencional ainda é proibitiva em termos econômicos. Podem ser divididos em duas configurações e serão detalhadas a seguir.

2.1.1 Configuração de Sistemas Isolados

Atualmente existem dois tipos de configurações para sistemas isolados; sistemas em corrente contínua direta e sistemas em corrente alternada com conversor CC/CA [10].

O mais simples dos sistemas autônomos é aquele onde existe apenas um conversor em corrente contínua (carregador de baterias) que carrega o banco de baterias. Os equipamentos a serem alimentadas são conectados diretamente nas baterias. Isto significa que, as cargas devem possuir normalmente tensão de operação 12 ou 24 Vcc [10], [17]. A Figura 2.1 apresenta o sistema em corrente contínua direta.

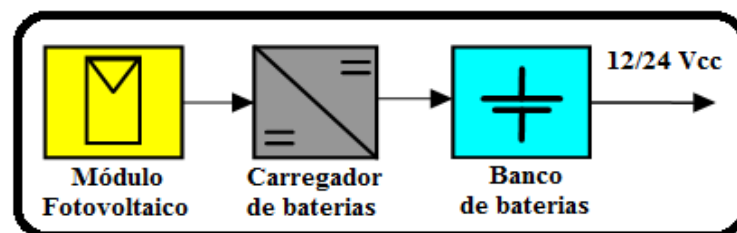


Figura 2.1 – Sistema em corrente contínua direta.

Esse sistema apresenta teoricamente algumas vantagens em relação ao outro citado acima, tais como: menores perdas já que é composto apenas de um conversor, menor

investimento inicial, menor custo de manutenção e operação, etc. [18]. O mesmo sistema apresenta como desvantagem a dificuldade de encontrar no mercado os equipamentos eletrônicos a serem utilizados.

Um modelo desse sistema foi instalado pela COPEL no litoral norte do estado do Paraná denominado de “centros fotovoltaicos de carregamento de baterias” – CFCB. Os CFCB’s consistem em módulos fotovoltaicos instalados junto ao prédio do centro de carga, fornecendo energia para o recarregamento de baterias. Nesse prédio são instaladas diversas tomadas (proporcional ao número de usuários) para que o usuário chegue e realize o recarregamento de sua bateria.

O sistema não obteve grande sucesso, pois os usuários submetiam as baterias a uma descarga profunda, dessa forma reduzindo drasticamente a vida útil das mesmas.

A segunda configuração seria para o caso onde se deseja utilizar equipamentos eletrônicos que operem em corrente alternada. Deve-se acrescentar ao sistema anterior um conversor CC/CA (inversor), como mostrado na Figura 2.2.

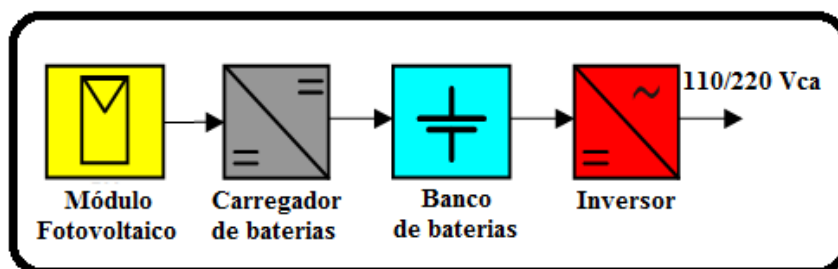


Figura 2.2 – Sistema em corrente alternada.

Dentre as configurações de sistemas isolados essa é a mais utilizada atualmente. Possui como vantagem a possível conexão de qualquer equipamento que opere em corrente alternada, desde que respeite os limites do sistema, assim como sua possível conexão a rede elétrica convencional. Como desvantagem possui menor rendimento, uma vez que apresenta perdas no carregador de baterias e no inversor. No caso do inversor, o com melhor

rendimento, apresenta rendimento máximo de 0,85 [18]. Ainda em relação às desvantagens também pode ser citado o maior custo do sistema devido à inclusão do inversor.

A energia proveniente da conversão fotovoltaica possui um custo elevado quando comparado a hidráulica. Baseado nessa informação cada vez mais os sistemas fotovoltaicos vêm passando por processos de aperfeiçoamento em sua eficiência. Os primeiros painéis fotovoltaicos construídos possuíam eficiência de conversão em torno de 1% a 2%. As células produzidas hoje para atender o mercado chegam a 17% [19]. Já é possível encontrar maior eficiência em protótipos de células fotovoltaicas construídas em laboratórios com materiais nobres, onde a produção comercial ainda é inviável.

O elevado preço da energia gerada através da conversão fotovoltaica está apontando para condições extremamente favoráveis à adoção de medidas de eficiência energética. A utilização de equipamentos de consumo de energia eficientes, mesmo que sendo mais caros que os comuns, reduzem consideravelmente o consumo e o tamanho do sistema [8]. Levando em consideração essa afirmação grande parcela dos novos sistemas fotovoltaicos está utilizando esses tipos de equipamentos. Podem ser citados como exemplos lâmpadas fluorescentes compactas e televisores LCD.

Todos esses equipamentos eficientes possuem estágio de retificação na sua entrada, dessa forma podendo ser conectados diretamente a um sistema em corrente contínua onde a tensão de operação seja 156 Vcc ou 311 Vcc dependendo da localidade a ser instalado. Para que esse valor de tensão seja alcançado deve-se inserir ao sistema em corrente contínua direta um conversor elevador CC/CC de alto ganho conforme apresenta a Figura 2.3.

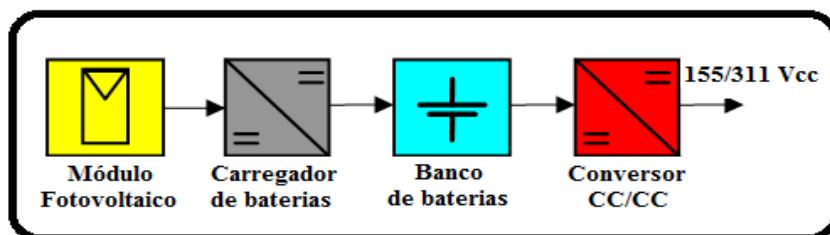


Figura 2.3 – Sistema em corrente contínua com conversor CC/CC elevador de tensão de alto ganho.

A Figura 2.3 apresenta uma terceira configuração de sistemas individuais onde a alimentação dos equipamentos é realizada em corrente contínua e tensão elevada. Esse modelo quando comparado ao de corrente contínua direta, apresenta desvantagem de maior perda, uma vez que possui as perdas que são inseridas ao adicionar o conversor elevador. Entretanto, comparando com o mesmo sistema, possui a vantagem de o usuário encontrar facilmente no mercado os equipamentos a serem utilizados.

Quando comparado aos sistemas de corrente alternada apresenta a vantagem de inserir menores perdas, uma vez que o conversor elevador proposto pode ser projetado para apresentar um maior rendimento que o inversor tanto a plena carga quanto a vazio.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre as três configurações de sistemas fotovoltaicos quanto ao menor custo inicial, maior eficiência e maior facilidade de encontrar os equipamentos a serem utilizados no mercado comum.

Tabela 1 – Comparação entre os três sistemas individuais.

Sistema	Custo inicial	Eficiência	Facilidade de encontrar equipamentos a serem utilizados
CC direto	Baixo	Elevada	Baixo
CA	Elevado	Média	Elevado
CC com conversor elevador de tensão	Médio	Elevada	Elevado

Observando a Tabela 1 e levando em consideração que na localidade onde será instalado o sistema não se pode encontrar facilmente os equipamentos específicos, é possível afirmar que os sistemas em corrente contínua com conversor elevador são mais atrativos. Assim, foi utilizada a proposta do sistema em corrente contínua com conversor elevador de tensão para este trabalho.

2.2 O Sistema Proposto

O protótipo foi desenvolvido para suprir com energia elétrica uma escola rural típica do estado do Piauí, e atendendo a Resolução Normativa de nº. 83, de 20 de setembro de 2004 e a Resolução Autorizativa nº. 927 de 29 de maio de 2007 – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), quantos aos critérios de autonomia no fornecimento de energia elétrica [11],[12].

O sistema total é composto pelos painéis solares, carregador de baterias, baterias estacionárias e conversor elevador conforme apresenta a Figura 2.4. No decorrer desse item, cada elemento será dimensionado de forma que possa suprir as necessidades do projeto.

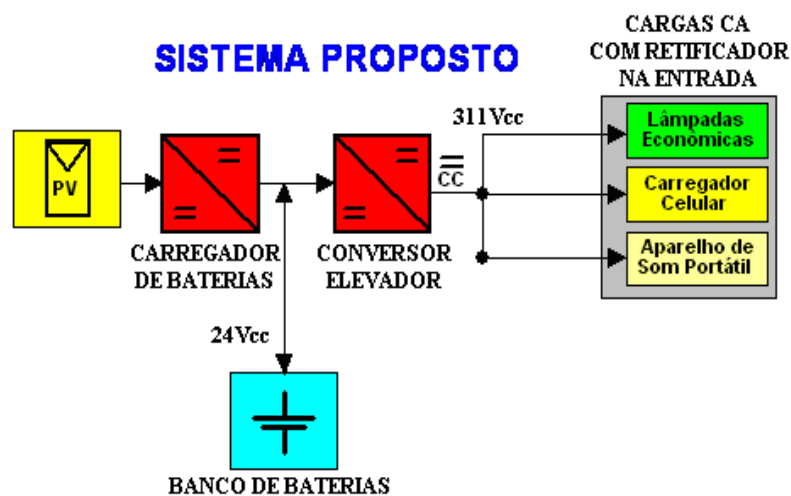


Figura 2.4 – Diagrama de blocos do sistema proposto.

2.2.1 Operação do Sistema

Durante o dia, período em que existe radiação solar, o painel fotovoltaico, podendo operar no ponto de máxima potência, carrega o banco de baterias através do carregador de baterias. O fornecimento de energia elétrica para a carga é realizado através do conversor elevador, o qual é responsável por elevar a tensão do banco de baterias de 24 Vcc para 311 Vcc. O protótipo foi instalado em uma escola rural apresentada no item a seguir.

2.2.2 Local Escolhido Para Instalação do Protótipo

O local escolhido para instalação do sistema foi uma escola rural que possui aulas somente no período da noite das 19h às 22h.

A escola é composta por duas salas de aula, um pequeno pátio, dois banheiros, uma cantina e um depósito. A Figura 2.5 apresenta fotografias da escola, da sala de aula, do pátio entre as duas salas de aula e dos banheiros.



Figura 2.5 – Fotografias da escola.

A região onde é localizada a escola possui boa disponibilidade de horas de sol pleno (HSP), conforme apresenta a Tabela 2. Entende-se por HSP à quantidade média de horas de sol a uma intensidade 1000 W/m^2 e é equivalente à energia total diária incidente sobre a superfície do gerador em kWh/m^2 . [4]

A Tabela 2 apresenta a radiação diária média mensal na região de Uruçuí-PI. São apresentados os valores mensais, a média e o delta. O delta é a diferença entre o maior e o menor valor mensal.

Tabela 2 – Radiação diária mensal na região de Uruçuí

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Méd	(Δ)
Valor (kWh/m ²)	4,78	4,79	4,89	5,04	5,32	5,86	6,32	5,68	5,95	5,68	5,25	4,94	5,37	1,54

2.2.3 Regulamentação e Estudo de Carga

O projeto em estudo visa o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico autônomo o qual se enquadra no atendimento a sistemas individuais, tendo como forma de energia primária a energia solar. A aplicação desse tipo de sistema se faz necessária em regiões remotas, onde o atendimento pelo sistema de distribuição convencional é economicamente inviável.

De acordo com o Decreto nº. 4.873, de 11 de novembro de 2003, titulado de “Luz para Todos”, um sistema individual deve estar apto a fornecer energia para: domicílios (um ponto de luz por cômodo até o limite de três pontos de luz e duas tomadas) e estabelecimentos coletivos: escolas e postos de saúde (o atendimento deve ser completo).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece os procedimentos e condições para os sistemas de geração descentralizados individuais em sua resolução Normativa nº. 83, de 20 de setembro de 2004, que é utilizada como base para as especificações do projeto.

Esses sistemas são nomeados de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI). Nas condições gerais da Resolução são colocadas como características obrigatórias aos SIGFI's, o fornecimento da energia elétrica em corrente alternada senoidal, com o mesmo padrão de tensão e frequência predominante no município

onde for instalado o sistema e deve estar enquadrado em uma das classes de atendimento explicitadas na Tabela 3 [11].

A fim de realizar estudos de alternativas mais econômicas à regulamentação vigente, a ANEEL, autorizou através da Resolução Autorizativa nº. 927 de 29 de maio de 2007, o estudo e a implantação de um projeto piloto com a opção de atendimento através de corrente contínua [8].

Tabela 3 – Classificação dos SIGFI's.

Classes de Atendimento	Consumo Diário de Referência (Wh/dia)	Autonomia (dias)	Potência Mínima (disponibilizada)	Disponibilidade Mensal Garantida (kWh)
SIGFI13	435	2	250	13
SIGFI30	1000	2	500	30
SIGFI45	1500	2	700	45
SIGFI60	2000	2	1000	60
SIGFI80	2700	2	1250	80

O projeto foi desenvolvido para alimentar uma escola rural que apresenta o perfil de carga apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Perfil de carga.

Quantidade	Descrição	Potência (W)	Demanda (h/dia)	Total (Wh/dia)
04	Lâmpada fluorescente compacta	(4x23) 92	3	276
02	Lâmpada fluorescente compacta	(2x11) 22	3	66
04	Lâmpada fluorescente compacta	(4x5) 20	3	60
01	Televisor	48	3	144
01	Parabólica	10	3	30
01	Rádio	10	3	60
01	DVD	20	3	60
Total				696

A distribuição da iluminação ficou da seguinte forma:

- Salas de aula: Duas lâmpadas fluorescentes compactas de 23 W;
- Corredor: Duas lâmpadas fluorescentes compactas de 11 W;
- Banheiros, depósito e cantina: Uma lâmpada fluorescente compacta de 5 W para cada compartimento.

Através da Tabela 4 pode-se observar que o consumo diário da escola é superior a 435 Wh/dia, mas não ultrapassa 1000 Wh/dia, dessa forma o atendido deverá ser realizado pelo SIGFI30. O fornecimento de energia elétrica deve ser garantido a qualquer período do ano independente das condições climáticas, dessa forma, no projeto foi levado em consideração o pior mês de radiação solar, que de acordo com a Tabela 2 é Janeiro o qual apresenta 4,78 kWh/m².

O método de dimensionamento utilizado para o sistema refere-se ao SIGFI30, o qual possui um consumo diário de referência de 1000 Wh/dia e autonomia do sistema de armazenamento de dois dias conforme apresenta a Tabela 3. Vale lembrar que se deve adicionar um dia de autonomia ao cálculo, uma vez que as baterias ao amanhecer do primeiro dia sem insolação já terão sofrido descarga durante a noite anterior.

A tensão do barramento do banco de baterias foi adotada 24 V no intuito de reduzir a corrente de entrada do conversor elevador e conseqüentemente minimizar as perdas por condução dos interruptores.

2.2.4 Os Conversores

De acordo com o item 2.2.1, o sistema proposto é composto por dois conversores; carregador de baterias e o conversor elevador de tensão. Nesse tópico será apresentada a configuração básica dos conversores, cujo detalhamento e a análise serão objeto dos capítulos seguintes.

Carregador de Baterias

A Figura 2.6 mostra a topologia do carregador de baterias. Esse conversor apresenta como vantagem a baixa ondulação de corrente na entrada e baixa ondulação de tensão na

saída, dessa forma reduzindo o tamanho do indutor de entrada e o capacitor de saída.

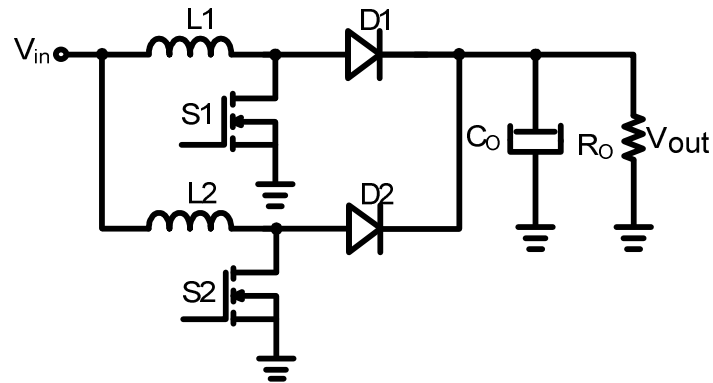


Figura 2.6 – Topologia do carregador de baterias.

Seu princípio de funcionamento é semelhante a dois conversores boost clássicos em paralelo com defasamento de 180° nos pulsos dos interruptores. Ou seja, no momento em que um conversor está armazenando energia fornecida pela entrada o outro está transferindo para a carga, desta forma existindo sempre a transferência de energia da entrada para saída, assim reduzindo a ondulação de tensão e corrente na sua saída.

Conversor Elevador

A Figura 2.7 apresenta a topologia do conversor elevador. De acordo com a necessidade do projeto, o mesmo deverá possuir tensão de entrada 24 Vcc e saída 311 Vcc, apresentando assim um ganho estático de $311/24$. Ou seja, o ganho é igual a aproximadamente 13. Para essa faixa de ganho (considerada bastante elevada), os conversores clássicos não-isolados não são interessantes, pois para altos ganhos, essas topologias requerem que o interruptor opere ao mesmo tempo com elevada corrente de entrada e elevada tensão de saída, caracterizando assim uma situação desfavorável do ponto de vista prático.

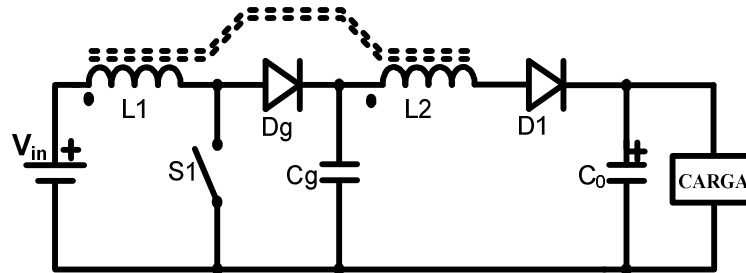


Figura 2.7 – Topologia do conversor elevador.

Seu princípio de funcionamento é semelhante a um conversor boost clássico, diferenciando apenas o indutor acoplado. No primeiro estágio, quando o interruptor S1 está conduzindo, o conversor armazena energia no indutor L1 enquanto que a carga é totalmente suprida pela energia armazenada no capacitor de saída C_0 . No segundo estágio o interruptor S1 é bloqueado e a energia armazenada no indutor L1 é transferida juntamente com a tensão de entrada para a carga. Nesse momento o capacitor de saída passa a ser carregado.

Foi adicionada a topologia original um circuito snubber regenerativo com objetivo de evitar sobretensões sobre o interruptor de potência. Posteriormente, serão analisadas as etapas de operação deste conversor.

2.2.5 Dimensionamento do Sistema

Neste item será dimensionado o sistema completo; gerador fotovoltaico, carregador de baterias, banco de baterias e conversor elevador de tensão.

Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico

Para dar início ao dimensionamento deve-se conhecer a potência consumida pelo sistema. Sabe-se que o sistema deve fornecer (SIGFI30) mensalmente 30 kWh/mês então se pode encontrar que o consumo diário é 1000 Wh/dia. Para conhecer o valor consumido por hora basta dividir o consumo diário por 24, quantidade de horas por dia. Entretanto, o sistema

opera apenas três horas por dia, conforme apresenta a Tabela 4, assim o consumo diário de referência referente às três horas diárias é aproximadamente 333,3 W.

Encontrado o consumo diário de referência deve-se corrigir esse valor de energia considerando a eficiência da bateria e do controlador de carga. No caso foi considerado $\eta_{bat}=0,85$ para eficiência da bateria e foram desprezadas as perdas no carregador de baterias devido à utilização do ponto de máxima potência (MPP). O painel fotovoltaico utilizado foi o KC130 T da Kyocera. O dimensionamento foi realizado de acordo com [19].

O valor corrigido corresponde à energia que o sistema de acumulação deve fornecer diariamente ao SFD para que sejam garantidos os 1000 Wh/dia na saída do gerador fotovoltaico de acordo com a Equação 1.

$$E_{Bat} = \frac{P_{out}}{\eta_{Bat}} \rightarrow P_{Bat} = 392,153W \quad (1)$$

Onde:

E_{Bat} – Energia diária em W corrigida;

η_{bat} – Eficiência da bateria;

P_{out} – Potência consumida pela carga.

A capacidade do sistema em um dia (Ah/dia) é dado pela Equação 2.

$$Ah_L = \frac{E_{Bat} \cdot t_{func}}{V_{CC}} \rightarrow Ah_L = 49,019Ah/dia \quad (2)$$

Onde:

A_{hL} – Capacidade diária do sistema (Ah/dia);

t_{func} – Tempo de funcionamento diário (3h);

V_{CC} – Tensão no barramento (24 V).

A capacidade média de geração de cada módulo por dia é dada pela Equação 3.

$$Ah_d = \frac{I_{rs} \cdot R_{med}}{R_s} \rightarrow Ah_d = 35,324 A \cdot h / dia \quad (3)$$

Onde:

A_{hd} – Capacidade média de geração de cada módulo por dia;

I_{rs} – Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico KC130 T (7,39A);

R_{med} – Radiação diária no Piauí (4780 W/m²/dia) [31];

R_s – Radiação solar padrão (1000 W/m²/dia).

O número mínimo de painéis fotovoltaicos é dado pela Equação 4.

$$NP = \frac{Ah_L \cdot V_{CC}}{Ah_d \cdot 12} \rightarrow NP = 2,775 \quad (4)$$

Através das Equações 3 e 4 pode-se observar que para suprir as necessidades da escola, o sistema deverá ser composto por três painéis fotovoltaicos KC130 T.

Dimensionamento do Elemento Armazenador

As principais especificações das baterias necessárias ao dimensionamento são; a capacidade individual de carga (em Ah), tensão nominal por elemento e a relação entre limite máximo de descarga profunda e o total de ciclos para a vida útil. Este último item merece destaque, pois irá afetar a quantidade de baterias no banco e também sua vida útil.

O sistema foi dimensionado para três dias de autonomia e uma profundidade máxima de descarga de 60% conforme apresenta a Equação 5.

$$C_{Bat} = \frac{Ah_L \cdot d}{D_c} \rightarrow C_{Bat} = 245,096 A \cdot h \quad (5)$$

Onde:

C_{bat} – Capacidade total das baterias (Ah);

d – Dias de autonomia (3 dias);

DC – Máxima profundidade de descarga (60%).

Dessa forma o banco de baterias será composto por quatro unidades de 12 V, 150 A totalizando 24 V, 300 A.

Capacidade do Carregador de Baterias

De acordo com a Equação 4 o carregador de baterias deverá ter capacidade de processar no mínimo a máxima potência fornecida pelos três painéis fotovoltaicos KC 130 T. Sabe-se que cada painel possui 130 Wp e a soma dos três totaliza 390 Wp, dessa forma o carregador de baterias deverá ser dimensionado para suportar potência nominal de 390 W.

Capacidade do Conversor Elevador

O conversor, denominado de elevador, é responsável por alimentar as cargas através da energia fornecida pelo banco de baterias, dessa forma a capacidade do conversor é encontrada através da potência demandada pelos equipamentos ligados a sua saída. Conforme os dados a Tabela 4 apresenta o perfil de carga da escola. Considerando que todas as cargas sejam ligadas ao mesmo tempo, será exigido que o conversor tenha capacidade de processar 222 W, dessa forma o mesmo deverá ser dimensionado para suportar carga nominal de 222 W.

De acordo com a Resolução Normativa nº. 83, o SIGFI30 deve disponibilizar potência mínima de 500 W para a carga, dessa forma foi construído um conversor com potência total de 600 W, sendo dividido em duas células paralelas, onde cada uma é capaz de processar 300 W.

2.2.6 O Sistema Completo

Uma vez realizado os cálculos e feitas às considerações necessárias para o sistema, finalmente pode-se chegar a configuração proposta que tem como base um carregador de baterias de 390 W, um conversor elevador de 600 W, um gerador fotovoltaico de 390 Wp (3 painéis de 130 Wp) e um banco de baterias de 600 Ah (4 baterias de 150 Ah) conforme apresenta a Tabela 5.

Tabela 5 – Componentes do projeto.

Quantidade	Componente	Descrição
03	Painel KC 130T	130 Wp
04	Bateria de chumbo ácido	12 V / 150 Ah
01	Carregador de baterias	390 W
01	Conversor elevador	600 W

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um breve estudo de sistemas fotovoltaicos mostrando as principais configurações de sistemas individuais, além do sistema proposto para esse trabalho. Foi apresentado o dimensionamento e o funcionamento de cada componente do sistema proposto.

Entre os tipos de configurações de sistemas fotovoltaicos individuais expostos, o que se mostrou mais atrativo, quando se tratando de localidades rurais isoladas, foi a configuração que opera com corrente contínua e possui conversor elevador de tensão de alto ganho.

Inicialmente o conversor elevador de tensão foi implementado para 300 W, já que seria necessário apenas 222 W. Entretanto para o sistema se enquadrar no SIGFI30 seria necessário

que o mesmo possuísse 600 W. Devido à urgência de o projeto estar pronto em um curto intervalo de tempo, e já era disponível o projeto para 300W, foi decidido que o mesmo passaria a ser composto por duas células paralelas de 300 W totalizando 600 W.

CAPÍTULO 3

3 O Carregador de Baterias

Esse capítulo apresenta o dimensionamento, o projeto, a simulação e o controle do conversor carregador de baterias. Será exposto seu princípio de funcionamento, assim como suas respectivas etapas de funcionamento, formas de onda e detalhes de comutação.

O conversor possui controle digital que tem como função monitorar a tensão na bateria, controlar a corrente de carga, gerar a razão cíclica para acionamento dos interruptores e fornecer comunicação com um display LCD externo, além da busca do ponto de máxima potência do painel (MPP - Maximum Power Point).

A saída do conversor é conectada a um banco de baterias e segundo [19] para um pequeno intervalo de tempo uma bateria pode ser considerada como uma fonte de tensão constante, dessa forma pode-se encontrar o ponto de máxima potência – MPP, através da procura da máxima corrente de carga.

3.1 Circuito Básico do Carregador de Baterias

A topologia escolhida para ser utilizada no conversor carregador de baterias foi a estrutura boost intercalado. A escolha deu-se devido à baixa ondulação de corrente na entrada (facilitando na procura do ponto de máxima potência) e ondulação de tensão na saída do conversor, desta forma reduzindo o volume e peso dos componentes.

A Figura 3.1 apresenta o circuito básico de potência do conversor boost intercalado que pode ser implementado na prática para o carregador de baterias.

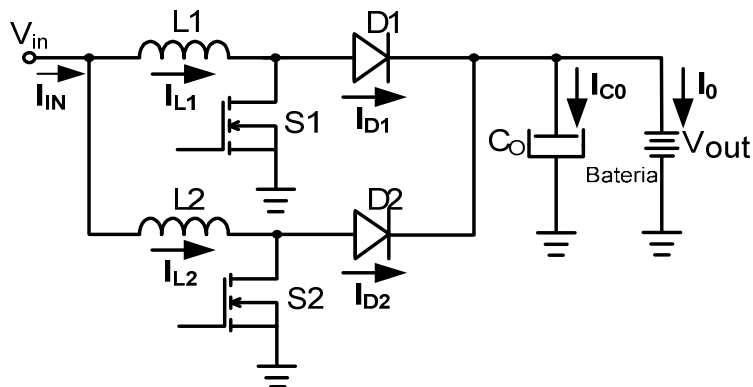


Figura 3.1 – Carregador de baterias.

O princípio básico de operação de um conversor boost intercalado operando MCC é semelhante à de dois conversores boost clássicos em paralelo operando com comando dos interruptores defasados de 180° em relação ao outro. Esse defasamento é responsável pela redução da ondulação de corrente na entrada e tensão na saída.

Pode-se observar na Figura 3.1 que a corrente de entrada do conversor boost intercalado (I_{IN}) é a soma das correntes dos dois indutores I_{L1} e I_{L2} , dessa forma ocorrendo uma anulação mútua dos picos das mesmas e por conseqüência existe uma redução de sua ondulação. Na mesma Figura é possível observar que sempre existe corrente circulando e carregando o capacitor de saída, assim o capacitor não sofrerá grande descarga e a ondulação em seus terminais é reduzida. A menor ondulação de corrente na entrada e tensão na saída ocorre quando o ciclo de trabalho esta ajustado para 0,5 [20].

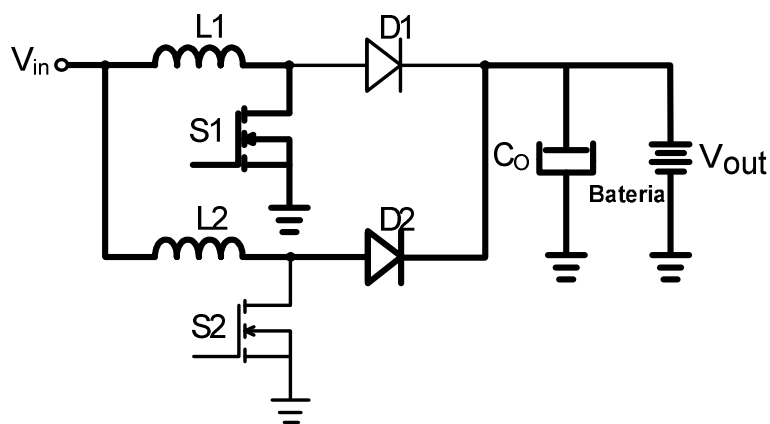
3.2 Etapas de Funcionamento do Carregador de Baterias

O princípio de funcionamento do conversor proposto pode ser entendido a partir da sua divisão em etapas de funcionamento, que é composta por duas etapas básicas, como ilustrado na Figura 3.2 a e b. A seguir são descritas ambas etapas de operação.

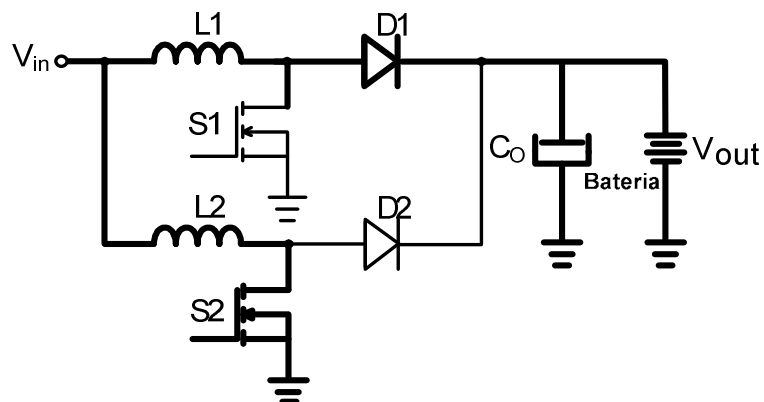
Deve-se ainda mencionar que a presente análise é realizada considerando que o conversor está operando no modo de condução contínua (MCC), onde é caracterizada a

continuidade da corrente nos indutores. Para facilitar o entendimento a razão cíclica foi considerada 0,5.

Deve-se considerar que o capacitor de filtro de saída (C_o) está carregado com a tensão V_{OUT} antes do início do primeiro estágio de operação.



a) Primeira etapa de funcionamento.



b) Segunda etapa de funcionamento.

Figura 3.2 – Etapas de funcionamento do conversor boost intercalado.

Primeiro estágio $[t_0, t_1]$ – É apresentado na Figura 3.2 a. Considera-se que nesse estágio, S1 e D2 estão conduzindo, L1 está armazenando e L2 está transferindo energia para a carga. Esse estágio tem início quando o interruptor S1 entra em condução. Durante o mesmo a fonte de entrada carrega o indutor L1, sua corrente (I_{L1}) cresce linearmente até seu valor

máximo enquanto que a carga é totalmente suprida pela energia armazenada em L2. A primeira etapa acontece até o momento onde o interruptor S1 é comandado a abrir.

Segundo estágio $[t_1, t_2]$ – É apresentado na Figura 3.2 b. O estágio tem início quando a corrente no indutor L1 é máxima e o interruptor S2 e o diodo D1 começam a conduzir. Durante esse estágio a fonte de entrada carrega o indutor L2, sua corrente (I_{L2}) cresce linearmente até o seu valor máximo enquanto que a carga é totalmente suprida pela energia armazenada em L1. Esse estágio acontece até o momento em que o interruptor S2 é comandado a abrir e o primeiro estágio volta a acontecer.

3.3 Formas de Onda do Carregador de Baterias

A Figura 3.3 apresenta as principais formas de onda teórica do conversor operando em modo de condução contínua e razão cíclica 0,5, onde são apresentadas as formas de onda dos pulsos nos interruptores S1 e S2, corrente nos interruptores, corrente nos diodos D1 e D2, corrente nos indutores L1 e L2, tensão e corrente na saída do conversor e a corrente no capacitor de filtro C_o .

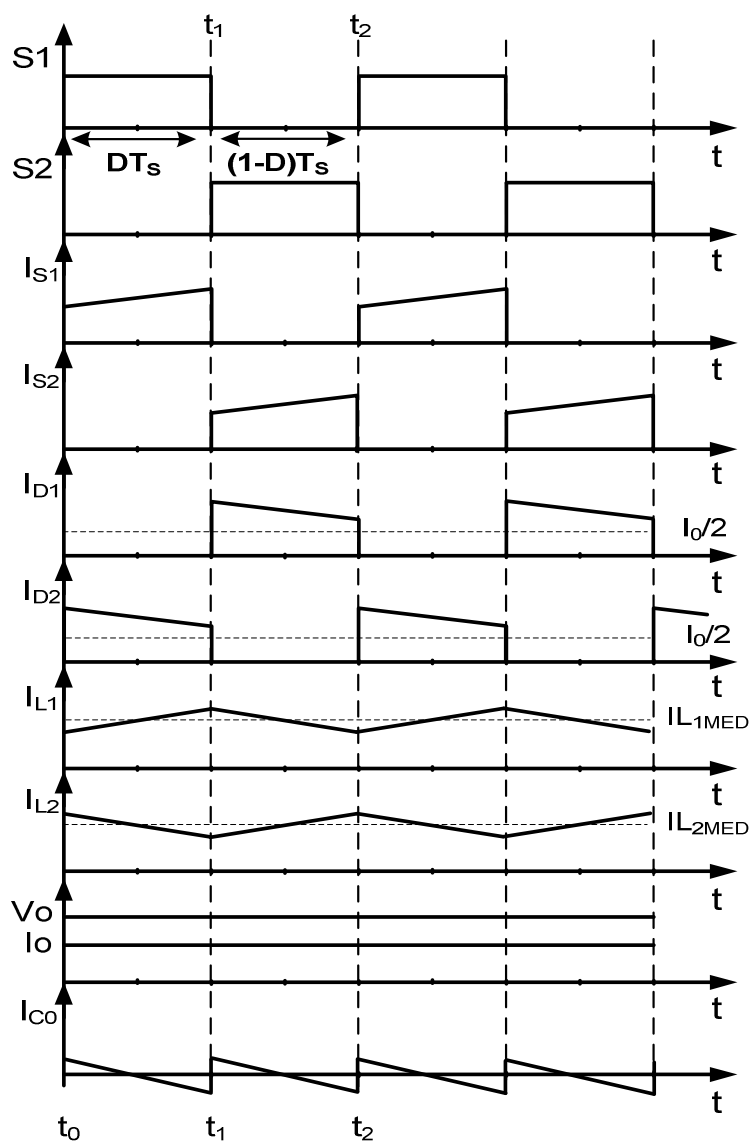


Figura 3.3 – Principais formas de onda do carregador de baterias.

3.4 Equacionamento do Carregador de Baterias

O seguinte tópico relaciona as equações básicas e essenciais ao projeto do circuito de potência do carregador de baterias.

Pode-se observar na Figura 3.4 que a topologia proposta pode ser comparada (no intuito de facilitar seu equacionamento) a dois conversores boost clássicos associados em paralelo.

Considerando esse fato o dimensionamento torna-se menos complexo uma vez que a topologia do conversor boost clássico já é bastante conhecida na literatura.

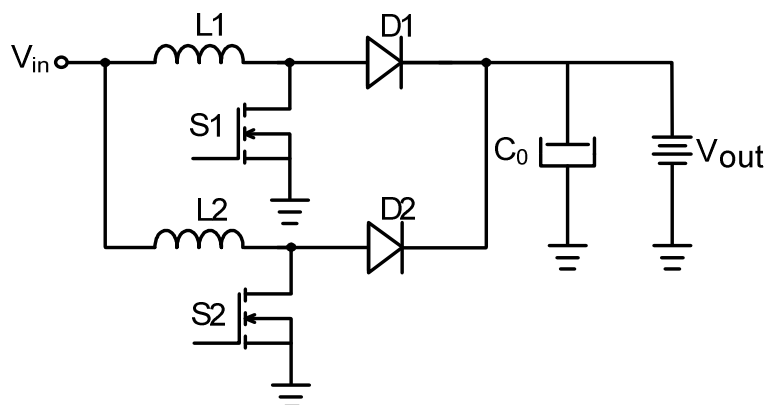


Figura 3.4 – Carregador de baterias.

A Figura 3.5 apresenta a topologia do conversor boost clássico.

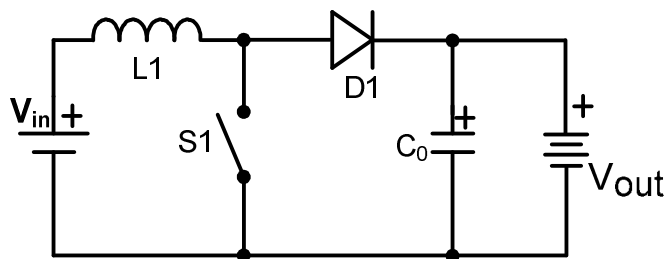


Figura 3.5 – Topologia do conversor boost clássico.

Analisando os conversores apresentados nas Figuras 3.4 e 3.5 a equivalência só não pode ser aplicada para o filtro capacitivo da saída, visto que a topologia em estudo apresenta a vantagem de possui baixa ondulação na tensão de saída, dessa forma necessitando de um valor de capacitância bem inferior quando comparado ao conversor boost clássico.

Assim, realiza-se o equacionamento de um dos conversores e repetem-se os parâmetros calculados para o outro (capacitor de entrada, indutores e razão cíclica).

3.4.1 Característica de Transferência Estática do Carregador de Baterias

A característica de transferência estática para o conversor boost operando em modo de condução contínua é dada pela Equação 6 [21],[22].

$$\frac{V_0}{V_{IN}} = \frac{1}{1-D} \quad (6)$$

Onde:

V_0 – Tensão na saída do conversor;

V_{IN} – Tensão na entrada do conversor;

D – Ciclo de trabalho.

A Equação 6 pode ser demonstrada graficamente através da Figura 3.6.

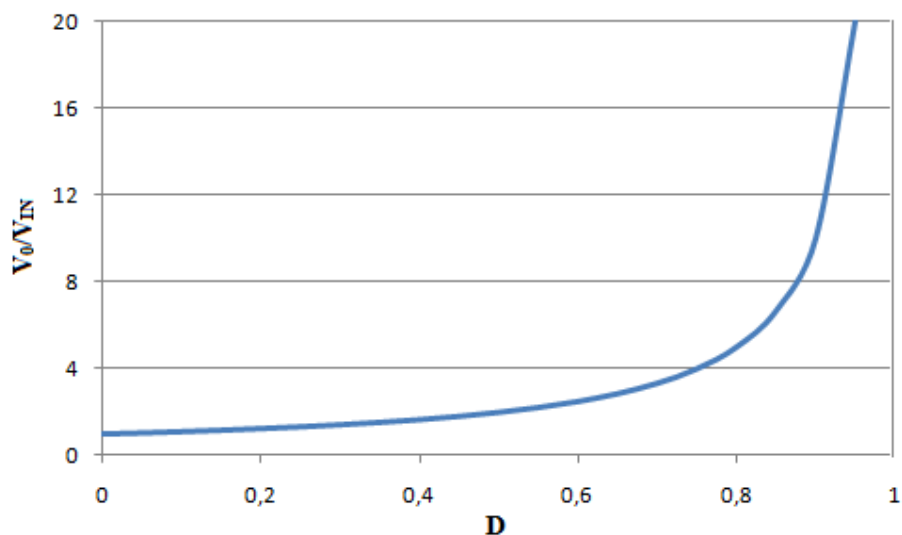


Figura 3.6 – Apresentação gráfica da característica de transferência do conversor boost.

3.4.2 Filtro de Entrada do Carregador de Baterias

O valor do indutor de entrada pode ser encontrado através da Equação 7 [21].

$$L_1 = \frac{V_{IN} \cdot D}{\Delta I_{IN} \cdot F_{CH}} \quad (7)$$

Onde:

ΔI_{IN} – Ondulação de corrente na entrada do conversor;

F_{CH} – Frequência de operação do conversor.

O painel fotovoltaico no ponto de máxima potência pode apresentar características tanto como fonte de corrente como fonte de tensão. O primeiro comportamento não é interessante para o conversor *boost* uma vez que quando alimentado por uma fonte de corrente constante a sua tensão de saída será reduzida à medida que a razão cíclica aumenta [19]. Dessa forma, é necessário a inclusão de um capacitor na entrada do conversor conforme apresenta a Figura 3.7. Esse capacitor tem como função garantir que o painel sempre opere como fonte de tensão.

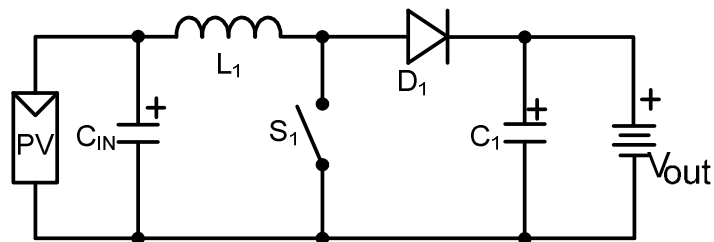


Figura 3.7 – Conversor boost com capacitor de entrada.

O valor de C_{IN} pode ser encontrado através da Equação 8 [6].

$$C_{IN} = \frac{L_1 \cdot I_{IN} \cdot \Delta I_{IN}}{V_{IN} \cdot \Delta V_{IN}} \quad (8)$$

Onde:

ΔV_{IN} – Ondulação de tensão na entrada do conversor.

3.4.3 Filtro de Saída do Carregador de Baterias

Pode-se observar que na Figura 3.3, através da forma de onda de V_o , que a ondulação na tensão de saída foi considerada nula. Na verdade esse fato não ocorre, visto que seria necessário um valor de capacitância infinito na saída do conversor.

Para concluir o equacionamento do conversor é necessário determinar a equação que define o valor da capacitância do capacitor de saída. Nesse dimensionamento será levada em consideração a ondulação na tensão da saída conforme apresenta a Figura 3.8.

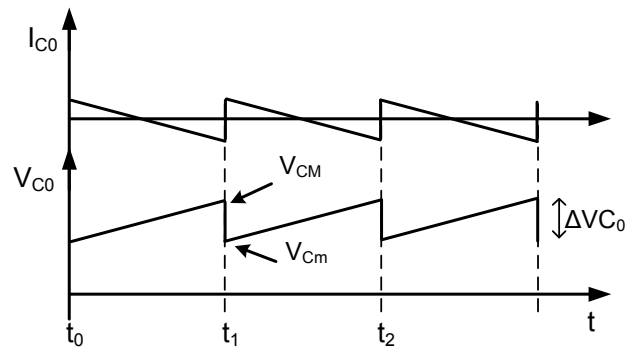


Figura 3.8 – Ondulação de corrente e tensão no capacitor de saída.

A corrente no capacitor é apresentada na Equação 9.

$$I_{C0} = C_0 \frac{dv_{C0}}{dt} \quad (9)$$

Durante o intervalo em que o interruptor S1 permanece conduzindo ($\Delta t=t_1$) o capacitor alimenta a carga com corrente (I_0-I_{D2}). Dessa forma a Equação 9 pode ser reescrita através da Equação 10.

$$\Delta v_{C0} = \frac{(I_0 - I_{D2}) \cdot t_1}{C_0} \quad (10)$$

Realizando as devidas operações matemáticas é possível chegar ao valor da capacitância conforme apresenta as Equações 11 e 12.

$$C_0 = \frac{(I_0 - I_{D2}) \cdot t_1}{\Delta v_{C0}} \quad (11)$$

Ou ainda;

$$C_0 = \frac{(I_0 - I_{D2}) \cdot D}{\Delta v_{C0} \cdot F_{CH}} \quad (12)$$

I_{D2} é a corrente que circula pelo diodo D2 e é apresentada na Equação 13.

$$I_{D2} = \frac{I_{IN}}{2} \cdot (1 - D) \quad (13)$$

3.5 Dimensionamento e Simulação do Carregador de Baterias

A Tabela 6 apresenta as especificações necessárias para realizar o projeto do carregador de baterias. Os parâmetros de entrada do conversor foram obtidos do *site* do fabricante dos painéis solares, Kyocera. [23]

Tabela 6 – Especificações do carregador de baterias.

ESPECIFICAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O PROJETO DO CARREGADOR DE BATERIAS	
Parâmetro	Valor
V_{CBIN} – Tensão de entrada	17,6 V
I_{CBIN} – Corrente de entrada	23,32 A
ΔI_{CBIN} – Ondulação de corrente na entrada	10% de I_{CBIN}
ΔV_{CBIN} – Ondulação de tensão na entrada	0,5% de V_{CBIN}
V_{CBOUT} – Tensão de saída	24 V
P_{CBOUT} – Potência na saída	390 W
η_{CB} – Rendimento do conversor	95%
ΔV_{CBOUT} – Ond. de tensão no capacitor de saída	0,1% de V_{CBOUT}
f_{CB} – Frequência de comutação	30 kHz

Para dar início ao dimensionamento deve-se encontrar o valor do ciclo de trabalho conforme apresenta a Equação 14.

$$D = \frac{V_{CBOUT} - V_{CBIN}}{V_{CBOUT}} = 0,267 \quad (14)$$

Os valores das indutâncias dos indutores são dados pela Equação 15.

$$L_1 = L_2 = \frac{D \cdot V_{CBIN}}{\Delta I_{CBIN} \cdot f_{CB}} = 67,1 \mu H \quad (15)$$

As características físicas desses indutores são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características físicas do indutor do Carregador de Baterias.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO INDUTOR DO CARREGADOR DE BATERIAS	
Núcleo do Entreferro	EE55/28 Thornton
Número de espiras	10
Fio utilizado no primário	25 x 21 AWG
Entreferro	0,3 mm
Densidade de fluxo utilizada	0,3 Tesla

O valor do capacitor de entrada é dado pela Equação 16.

$$C_{IN} = \frac{67,1 \cdot 10^{-6} \cdot 23,32 \cdot 2,33}{17,6^2 \cdot 0,005} = 2.360 \mu F \quad (16)$$

O valor da corrente que circula pelo diodo D2 é dado pela Equação 17.

$$I_{D2} = \frac{I_{CBIN}}{2} \cdot (1 - D) = 8,55 A \quad (17)$$

O valor da capacitância do capacitor de saída é dado pela Equação 18.

$$C_0 = \frac{\left(\frac{390}{24} - 8,55 \right) \cdot 0,267}{0,001 \cdot 24 \cdot 30000} = 2851 \mu F \quad (18)$$

Os MOSFET's utilizados foram o IRFB3207 da International Rectifier, os quais possuem resistência e corrente de condução respectivamente 3,6 mΩ, 180 A e tensão de bloqueio de 75 V [24].

Os diodos utilizados foram 30CPQ060 da International Rectifier, diodo Schottky. A tensão de bloqueio desse diodo é de 60 V e a corrente de condução 30 A [25].

O modelo equivalente do painel fotovoltaico foi o mesmo utilizado em [19].

O circuito utilizado para simulação no ORCAD é apresentado na Figura 3.9.

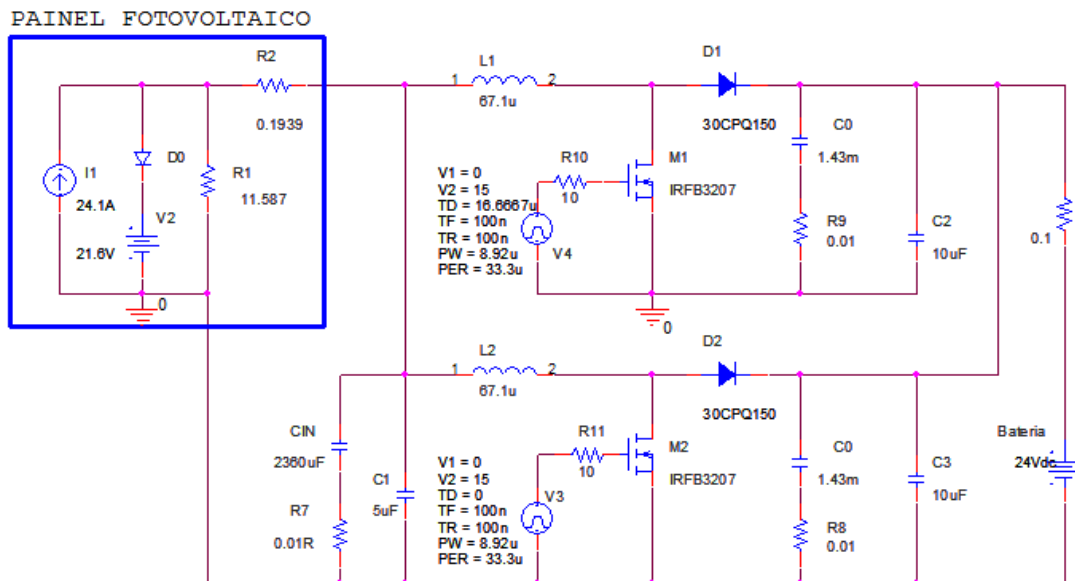
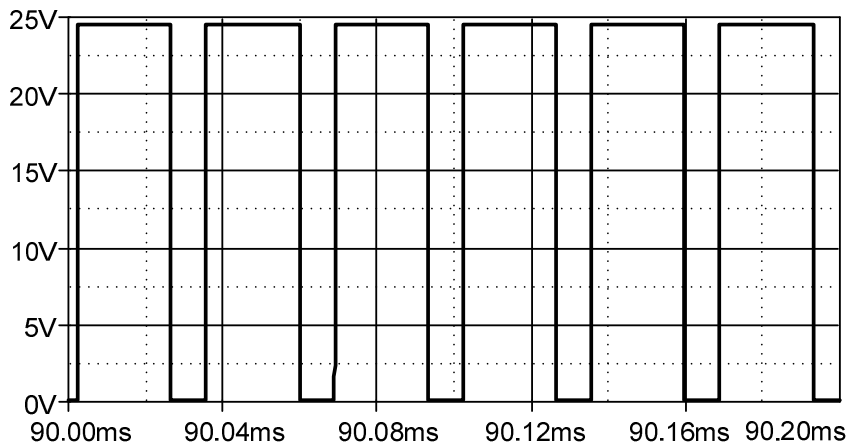


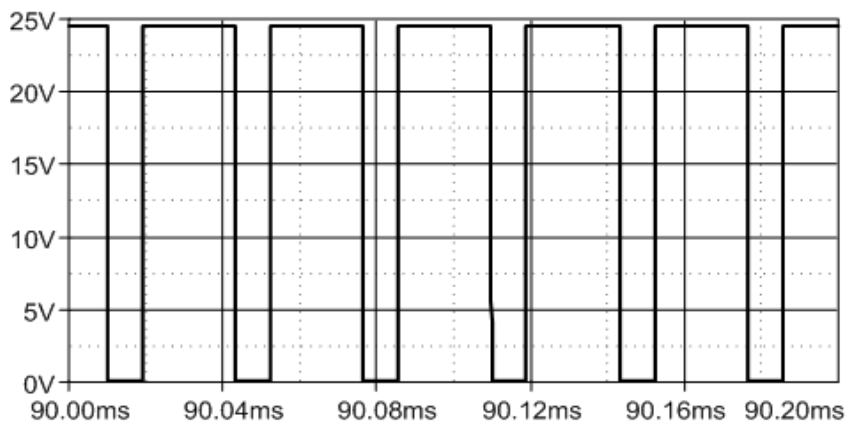
Figura 3.9 – Circuito de simulação do carregador de baterias.

A seguir são apresentados os principais resultados de simulação do conversor alimentando um banco de baterias. Esse conversor possui característica de fonte de tensão na saída. Sabe-se que duas fontes de tensão não podem ser conectadas em paralelo, dessa forma foi adicionado um resistor entre o conversor e a carga, o qual representa a resistência do fio acrescido da resistência interna da bateria.

A Figura 3.10 a e b apresenta respectivamente a tensão sobre os interruptores S1 e S2 do carregador de baterias.



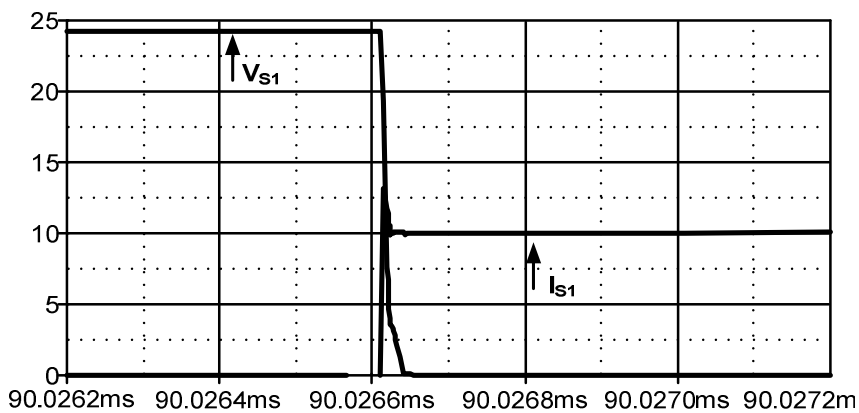
a) Interruptor S1.



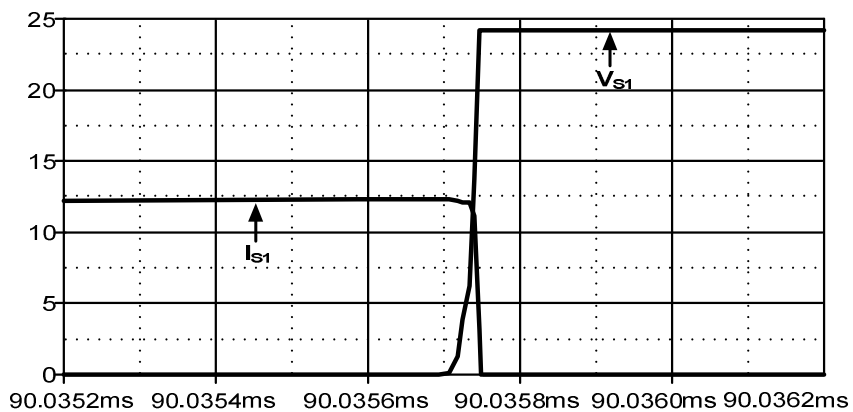
b) Interruptor S2

Figura 3.10 – Tensão sobre os interruptores S1 e S2.

A Figura 3.11 a e b apresenta respectivamente as formas de onda característica de tensão e corrente na entrada em condução e bloqueio do interruptor S1.



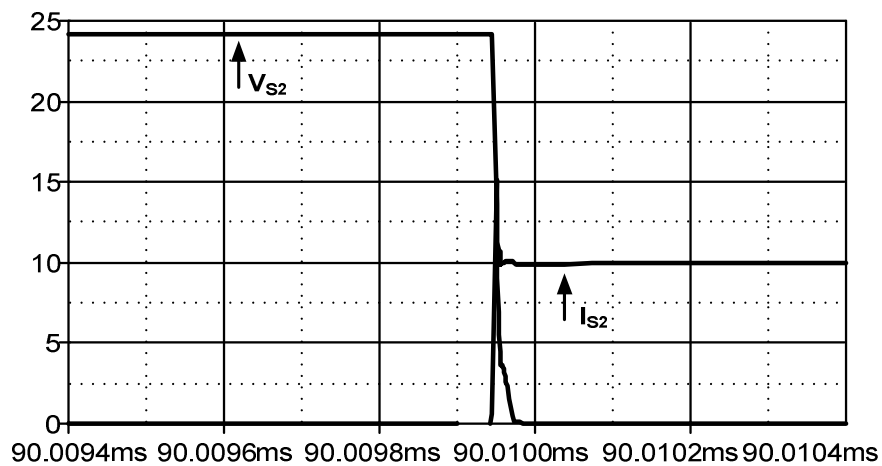
a) Entrada em condução do interruptor S1.



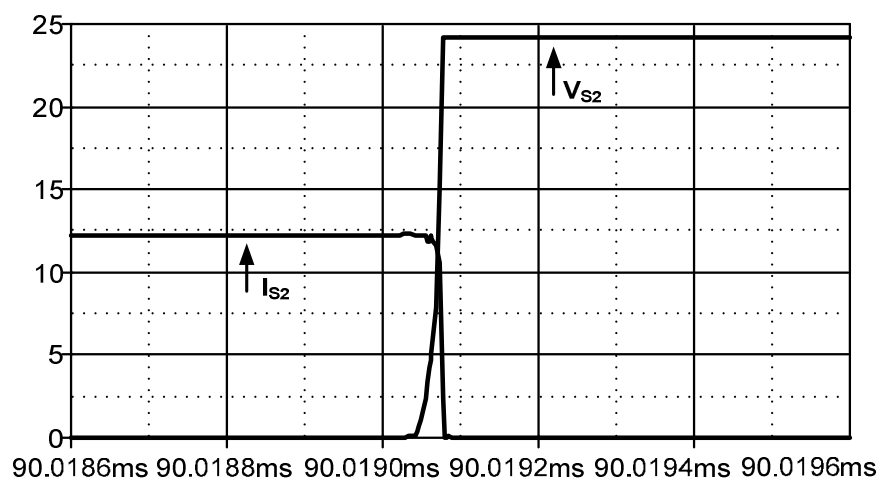
b) Bloqueio do interruptor S1.

Figura 3.11 – Entrada em condução e bloqueio do interruptor S1.

A Figura 3.12 a e b apresenta respectivamente as formas de onda característica de tensão e corrente na entrada em condução e bloqueio do interruptor S2.



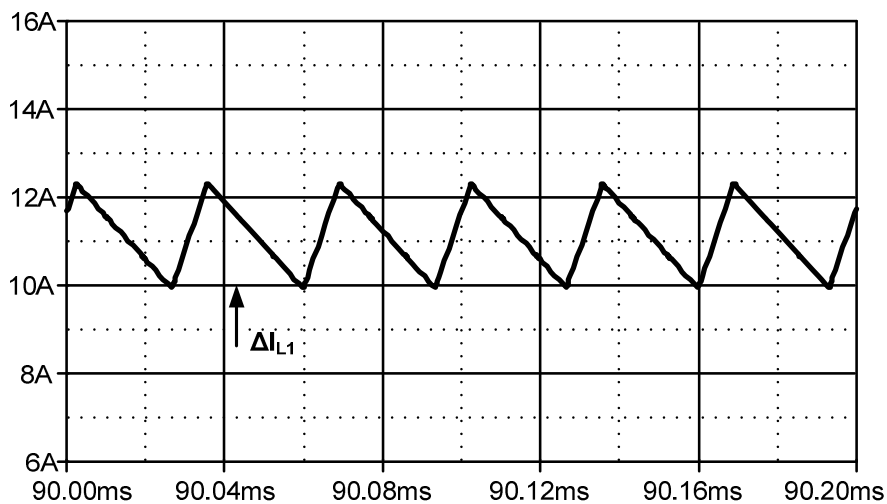
a) Entrada em condução do interruptor S2.



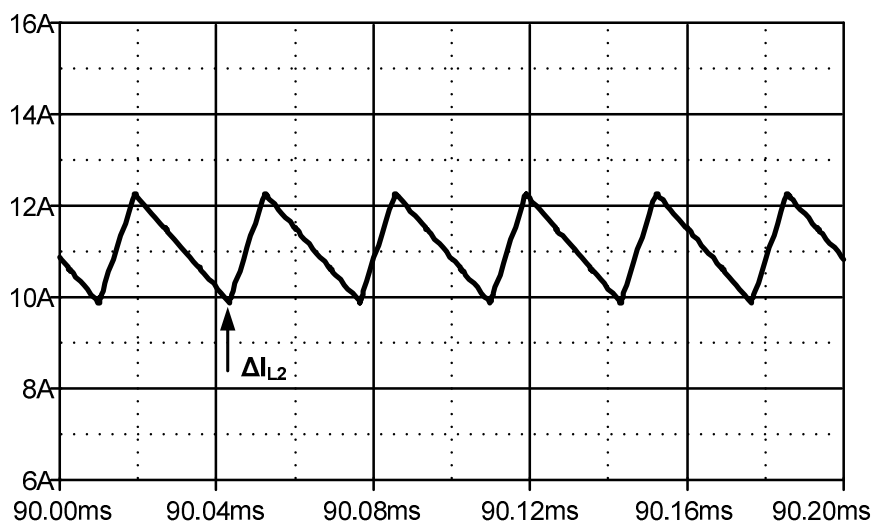
b) Bloqueio do interruptor S2.

Figura 3.12 – Entrada em condução e bloqueio do interruptor S2.

A Figura 3.13 a e b apresenta respectivamente a corrente nos indutores L1 e L2.



a) Corrente no indutor L1.



b) Corrente no indutor L2.

Figura 3.13 – Corrente nos indutores L1 e L2.

A Figura 3.14 apresenta a tensão na saída do carregador de baterias. Pode-se observar que existe uma pequena ondulação nessa tensão a qual é mais bem detalhada na Figura 3.15.

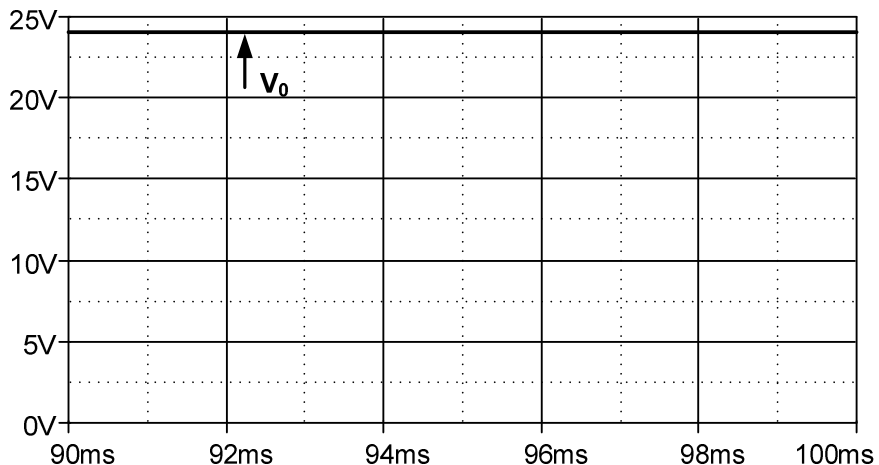


Figura 3.14 – Tensão na saída do conversor elevador.

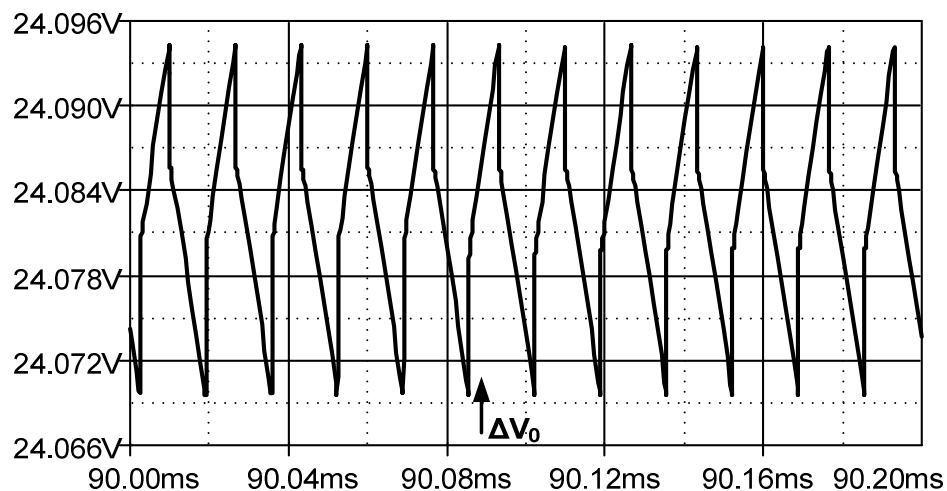


Figura 3.15 – Detalhe da ondulação da tensão na saída do conversor elevador.

3.6 Controle do Carregador de Baterias

O circuito de controle foi implementado utilizando o microcontrolador ATMEGA32[32]. Este microcontrolador de tecnologia RISC possui conversor AD interno, o qual foi utilizado para realizar a leitura da tensão da bateria, corrente de carga e tensão no painel fotovoltaico. Além dessas funções o microcontrolador também gera a razão cíclica de controle dos interruptores e busca o ponto de máxima potência do painel (MPP - Maximum Power Point) para qualquer nível de radiação solar e qualquer valor de tensão na bateria.

O banco de baterias será conectado a saída do conversor, onde a tensão do mesmo pode ser considerada constante para um pequeno intervalo de tempo, dessa forma podendo-se encontrar o ponto de máxima potência através da procura da máxima corrente de carga, assim simplificando o algoritmo de controle [20]. Para realizar a leitura da corrente de carga foi utilizado um sensor de corrente Allegro ACS752/SCA-050.

No momento em que o circuito de controle é ligado, o microcontrolador através do conversor A/D realiza a leitura da tensão da bateria para ter uma estimativa de sua carga. De acordo com o valor da tensão lida será determinado a razão cíclica inicial do carregador de baterias. O processo de carga procederá de acordo com a faixa de tensão da bateria conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.16.

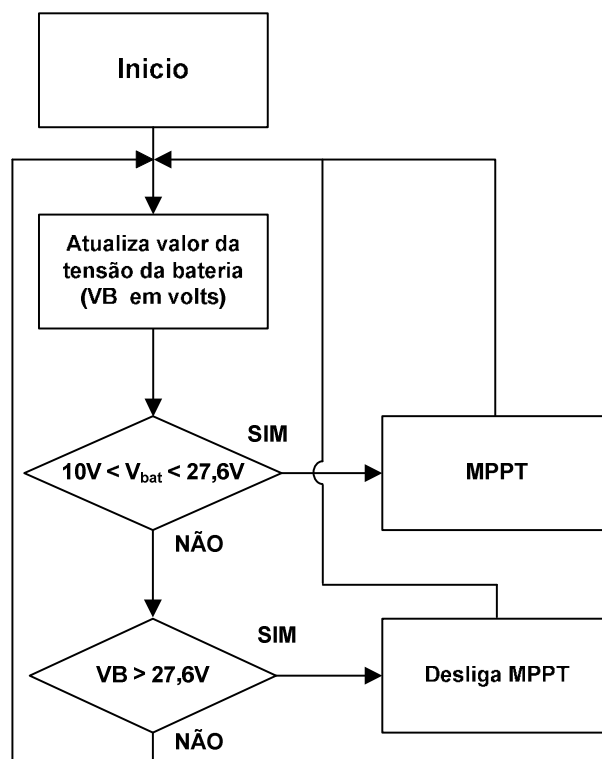


Figura 3.16 – Fluxograma da rotina de proteção do MPP.

1. $10\text{ V} \leq V_{\text{bat}} < 27,6\text{ V}$ - Carregamento no ponto de máxima potência;
2. $V_{\text{bat}} > 27,6\text{ V}$ - O controle desliga o PWM e só retorna a ligar quando a tensão na bateria for inferior a 26 V.

O algoritmo de procura do ponto de máxima potência é semelhante ao utilizado por [19]. Se as baterias estiverem descarregadas, a transferência da potência se faz de maneira integral através da rotina normal do MPPT a qual pode ser vista no fluxograma da Figura 3.17.

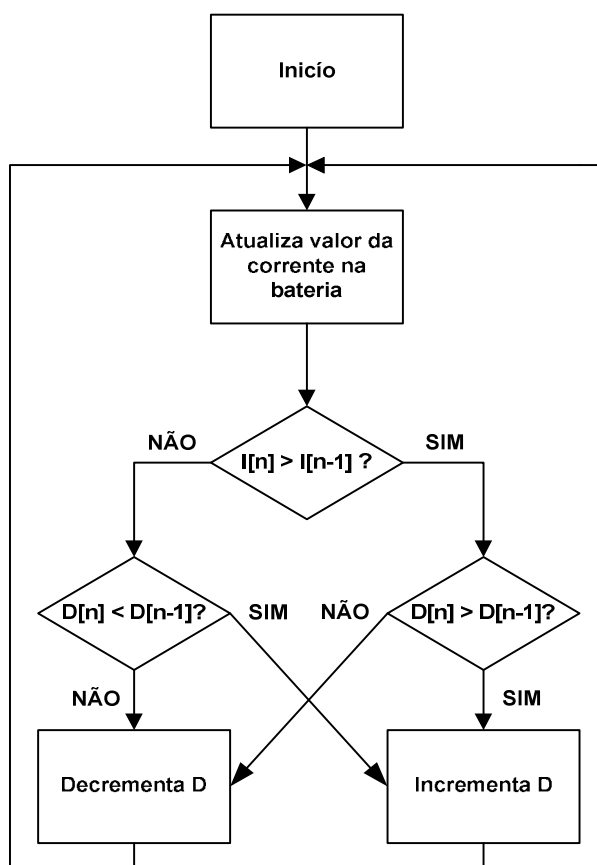


Figura 3.17 – Fluxograma da rotina padrão do MPPT.

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi estudado o comportamento do carregador de baterias, apresentado suas formas de onda, princípio de funcionamento, dimensionamento, projeto e controle. A topologia utilizada foi a *boost* intercalado.

O dimensionamento da topologia proposta foi realizado fazendo uma analogia a dois conversores boost clássico, operando em paralelo com defasamento de 180° entre o comando dos interruptores.

Foi inserido um filtro capacitivo a entrada do conversor, o que garante que o painel sempre opere como fonte de tensão.

Através das simulações realizadas no ORCAD, foi possível observar que os resultados foram ao encontro aos valores calculados, assim validando o modelo matemático do circuito.

CAPÍTULO 4

4 O Conversor Elevador

O presente capítulo apresenta o princípio de funcionamento, dimensionamento, projeto e simulação do conversor elevador de tensão. Este conversor possui a função de elevar a tensão contínua do banco de baterias (24 V – nominal) para uma tensão também contínua (311 V), com o intuito de alimentar diretamente em corrente contínua, cargas de baixa potência que possuam retificador de entrada intrínseco ou tenham características resistiva.

Uma revisão sobre topologias de conversores CC/CC elevadores é apresentada, sendo escolhida para utilização neste projeto a topologia do conversor boost de alto ganho com indutor acoplado. As equações básicas e as etapas de funcionamento são fornecidas, bem como o projeto e simulação de um conversor com potência de 300 Wp. Por fim, são apresentados os resultados de simulação.

4.1 Seleção da Topologia do Conversor Elevador

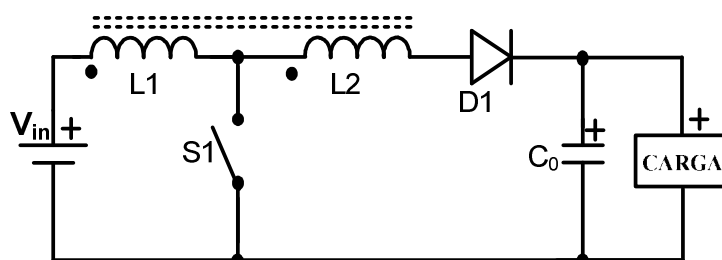
Os conversores CC/CC podem ser divididos em dois grandes grupos: conversores isolados e conversores não-isolados. Em relação aos conversores isolados para elevação de tensão, pode-se encontrar na literatura as seguintes topologias básicas: *flyback*, *forward*, *push-pull*, *half bridge* e *full bridge* [22],[26].

É possível ainda encontrar na literatura várias topologias básicas de conversores elevadores não-isolados: *boost* clássico, *boost* modificado, *boost* de alto ganho, *boost* em cascata, *boost* intercalado, *boost* intercalado de alto ganho, *buck-boost* clássico, *buck-boost* modificado e *buck-boost* de alto ganho, *cuk*, *sepic*, *zeta* [21],[22],[26].

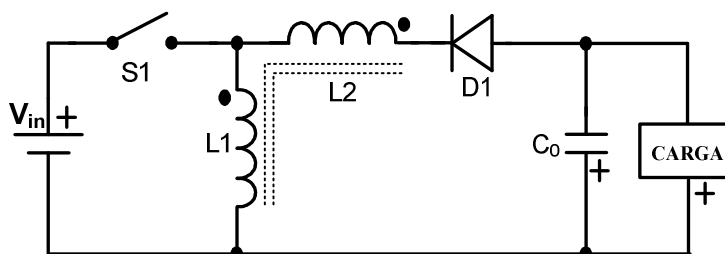
De acordo com a necessidade do projeto, o conversor elevador a ser projetado deverá possuir tensão de entrada de 24 Vcc e saída de 311 Vcc, apresentando assim um ganho estático de $311/24$, ou seja, ganho igual a aproximadamente 13. De fato, para esta faixa de ganho (considerada bastante alta), os conversores clássicos não-isolados não são apropriados, pois levam a um fator de utilização muito baixo do interruptor de potência [27]. Em outras palavras, para altos ganhos, essas topologias requerem que o interruptor opere ao mesmo tempo com elevada corrente de entrada e tensão de saída, caracterizando assim uma situação desfavorável do ponto de vista prático.

Por outro lado, as topologias não-isoladas modificadas e de alto ganho, são apropriadas para operar com altos ganhos, uma vez que utilizam interruptores associados em cascata ou indutores acoplados o que garante uma melhor utilização de cada interruptor de potência [28].

A Figura 4.1 apresenta as topologias não-isoladas de alto ganho e cascata.



a) Boost de alto ganho



b) Buck-Boost de alto ganho

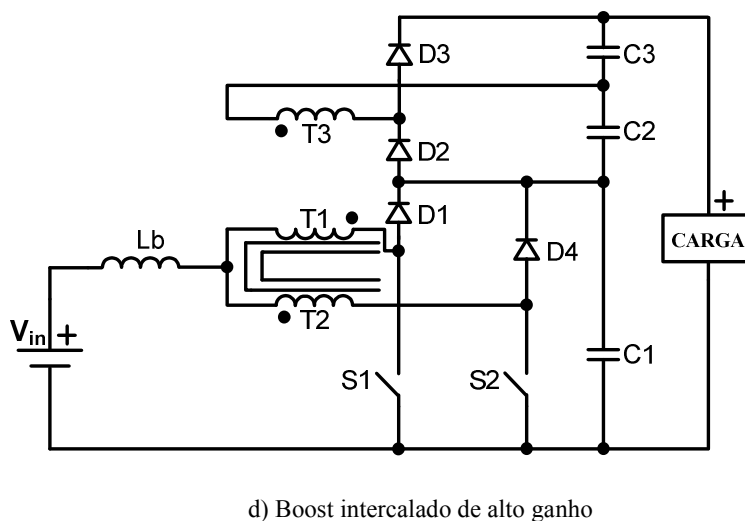
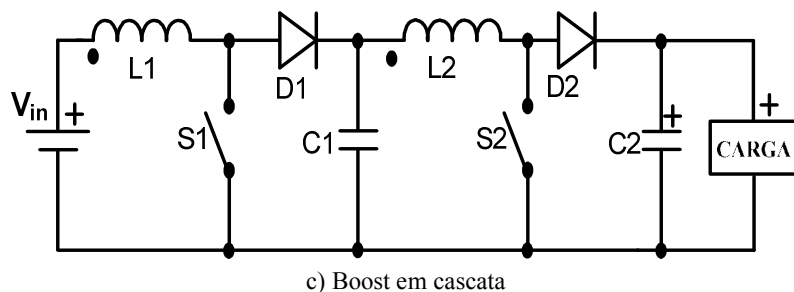


Figura 4.1 – Topologias não isoladas, modificadas e de alto ganho.

Comparando as topologias a, b, c e d, pode-se observar que as topologias c e d utilizam dois interruptores de potência enquanto que as topologias a e b apenas um. Dessa forma, levando em consideração o custo, optou-se por usar uma destas duas últimas topologias mencionadas.

A escolha final entre as topologias a e b pode ser baseada na questão da relação entre as polaridades da tensão de entrada e saída. De fato, pode-se observar que a topologia b produz uma tensão de saída invertida em relação à tensão de entrada, o que dificulta a implementação prática dos circuitos de controle. Por este motivo, a topologia selecionada para este projeto é a do conversor *Boost* de alto ganho (a).

4.2 Circuito Básico do Conversor Elevador

A Figura 4.2 apresenta o circuito básico de potência que pode ser utilizado para implementar na prática a topologia original apresentada na Figura 4.1 a.

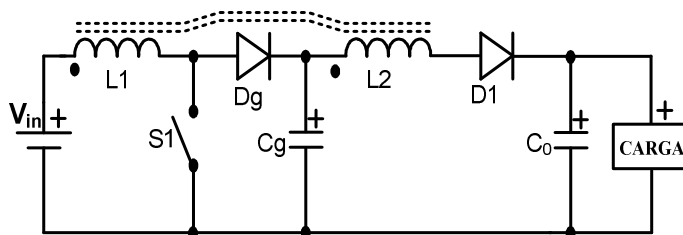
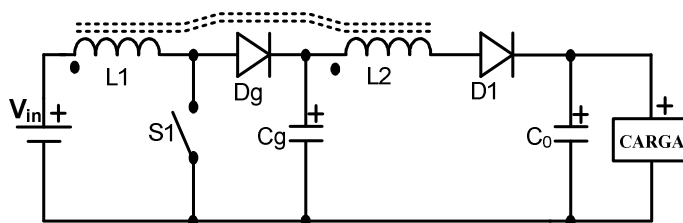


Figura 4.2 – Conversor boost de alto ganho com grampeador.

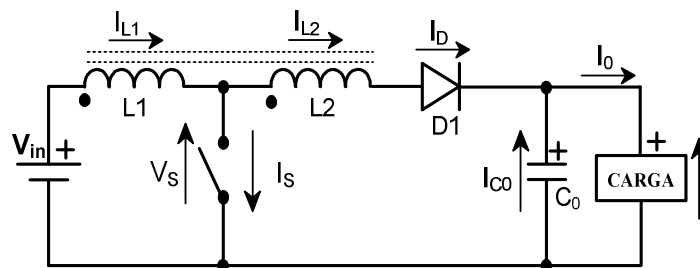
Pode-se observar que a diferença básica entre os circuitos das Figuras 4.1 a e 4.2 consiste na adição na Figura 4.2 de um circuito “*snubber* regenerativo” entre o interruptor e o indutor $L2$. Este circuito é composto de um diodo e um capacitor, e tem como função minimizar sobretensões que possam surgir sobre o interruptor devido ao acoplamento não ideal entre os indutores $L1$ e $L2$.

4.3 Etapas de Funcionamento do Conversor Elevador

Como já foi mencionado, o circuito “*snubber* regenerativo” adicionado à topologia original têm a função prática de evitar sobretensões sobre o interruptor de potência. Em uma primeira análise, pode-se retornar ao circuito básico da topologia do conversor *boost* de alto ganho. Para a melhor compreensão e organização do texto, ambos os circuitos completo e simplificado são mostrados novamente na Figura 4.3, sendo que na Figura 4.3 b são identificadas as tensões e correntes para referência posterior.



a) Circuito completo.

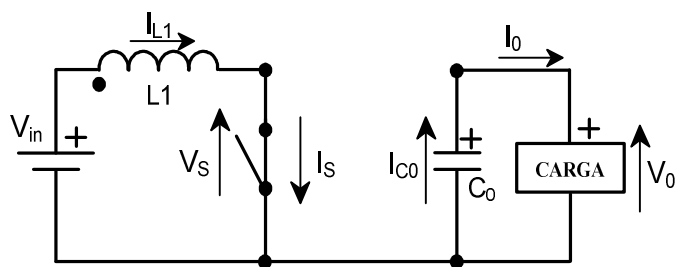


b) Circuito simplificado.

Figura 4.3 – Circuito completo e simplificado do conversor *boost* de alto ganho.

O princípio de funcionamento do conversor proposto pode ser entendido a partir da sua divisão em etapas de funcionamento, que é composta por duas etapas básicas, como ilustrado na Figura 4.4.

Deve-se ainda mencionar que a presente análise é feita considerando-se o modo contínuo de operação. Neste caso, devido à presença de um indutor acoplado, o modo contínuo de operação é caracterizado pela continuidade da energia armazenada no indutor acoplado. Pelo fato do conversor apresentar elevada relação de transformação, (24 V para 311 V) a impedância do secundário será superior a do primário, dessa forma provocando variações bruscas de corrente no instante em que o interruptor abre e as indutâncias são associadas em série.

a) Primeira etapa de funcionamento ($t_0 < t < t_1$)

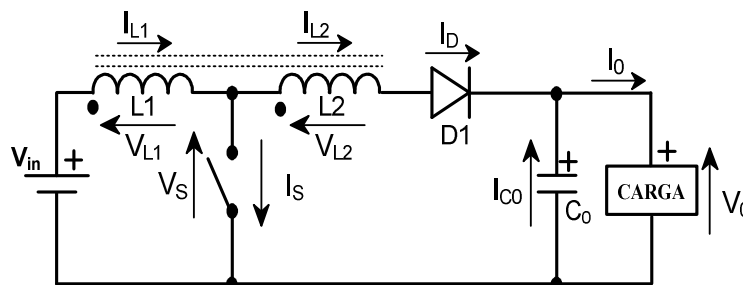
b) Segunda etapa de funcionamento ($t_1 < t < t_2$)

Figura 4.4 – Etapas de funcionamento do conversor elevador.

Primeiro estágio [t_0, t_1] - É apresentado na Figura 4.4 a. Pode-se observar que nessa etapa de funcionamento (interruptor conduzindo), a fonte de entrada carrega o indutor L1 enquanto que a carga é totalmente suprida pela energia armazenada no capacitor de saída C_0 .

Segundo estágio [t_1, t_2] - É apresentado na Figura 4.4 b. Na segunda etapa de operação (interruptor bloqueado), tem-se que a energia armazenada no indutor acoplado é transferida para a saída (juntamente com uma parcela devido à fonte de entrada que está em série). Nesta etapa, a corrente que flui através do diodo de saída I_d carrega o capacitor de saída, bem como supre a corrente de carga. Pode-se esperar também que apesar de uma variação muito brusca a corrente no indutor L1 (I_{L1}) não se anula, garantindo assim o modo de condução contínua.

4.4 Formas de Onda do Conversor Elevador

As principais formas de tensão e corrente são apresentadas na Figura 4.5. Em relação à sobretensão no interruptor de potência, pode-se observar que a mesma é igual à tensão da fonte de alimentação acrescida da tensão em V_{L1} . Desde que o valor de L1 é uma fração do valor total $L1 + L2$, têm-se que a sobretensão no interruptor é acrescida apenas de uma pequena parcela do valor da tensão de saída. Esta é justamente a grande vantagem do conversor *boost* de alto ganho em relação ao conversor *boost* clássico.

Durante o intervalo em que o interruptor está conduzindo, pode-se observar que a corrente no indutor L1 cresce de forma linear; comportamento já previsto visto que a tensão sobre L1 é aproximadamente constante e igual à tensão de entrada.

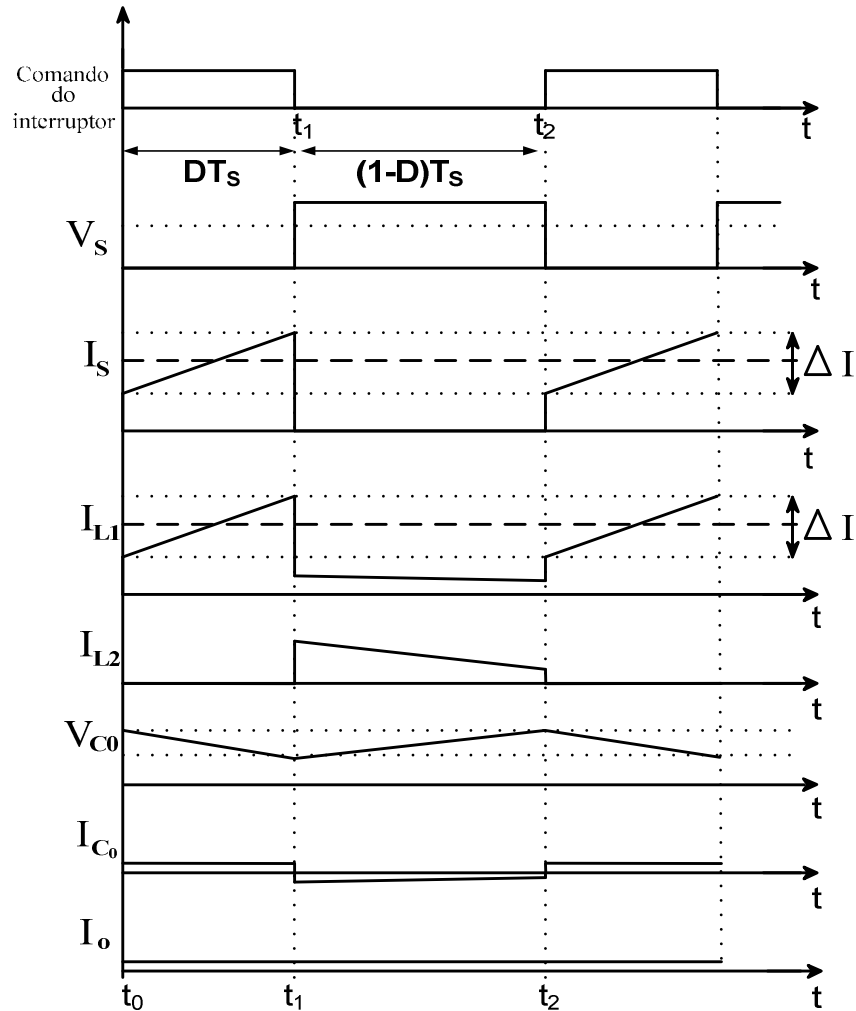


Figura 4.5 – Principais formas de onda para o circuito básico do conversor elevador.

O modo contínuo de operação do conversor também pode ser observado na forma de onda da corrente do indutor L1, I_{L1} . Todavia, em contradição ao princípio de funcionamento do conversor *boost* clássico, onde as variações ΔI das correntes nos indutores são iguais para os intervalos de carga e descarga do indutor de entrada, tem-se que para o conversor proposto estas variações não são equivalentes. Este fato ocorre porque o processo de carga é feito

somente através de $L1$ enquanto que o processo de descarga é feito através do conjunto $L1$ e $L2$. Pode-se ainda observar que a corrente no indutor $L2$ é igual à corrente em $L1$ durante o intervalo de descarga (interruptor bloqueado), sendo nula durante o intervalo de carga (interruptor conduzindo).

Finalmente, o gráfico de I_{C0} mostra que a corrente média no capacitor é nula, sendo que o mesmo fornece toda a corrente de carga durante a primeira etapa de operação.

4.5 Equacionamento do Conversor Elevador

O equacionamento do conversor proposto pode ser realizado através do modelo equivalente mostrado na Figura 4.6. Neste modelo, assume-se que um indutor de carga L_m ($L_m = L1$) é carregado durante a primeira etapa de operação e que o mesmo é descarregado através de um transformador ideal, cuja relação de transformação é uma função de $L1$ e $L2$.

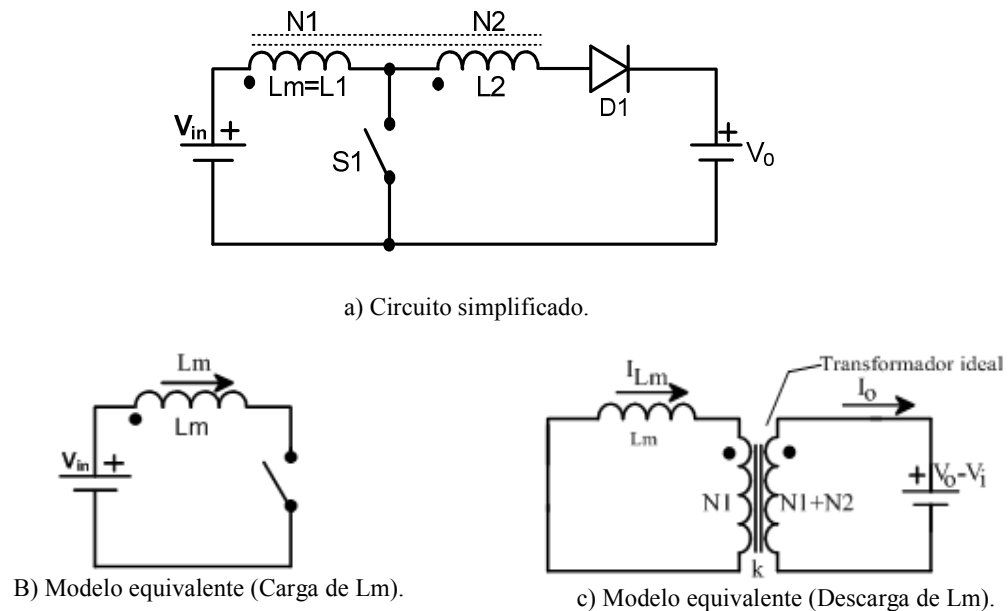


Figura 4.6 – Etapas de funcionamento do conversor elevador.

4.5.1 Relação de Transformação

Para realizar o equacionamento, é preferível que se defina qual é a relação de transformação k para o modelo equivalente, dada pela Equação 19.

$$k = \frac{N_1 + N_2}{N_1} = 1 + \frac{N_2}{N_1} \quad (19)$$

Onde:

K – Relação de transformação do indutor acoplado;

N1 – Número de espiras do indutor L1;

N2 – Número de espiras do indutor L2;

4.5.2 Indutâncias do Conversor Elevador

Na verdade, apesar da Equação 19 ser função dos números de espiras N1 e N2, não é necessário saber os valores absolutos dos mesmos, uma vez que k contém apenas a informação sobre a relação N2 / N1. Os valores de L1 e L2 podem ser recuperados a partir dos parâmetros Lm e k do modelo equivalente, utilizando-se as Equações 20 e 21 b.

$$L_1 = L_m \quad (20)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2} \text{ e } \frac{N_1}{N_2} = (k - 1) \Rightarrow \quad (21a)$$

$$\Rightarrow L_2 = L_1 (k - 1)^2 = L_m (k - 1)^2 \quad (21b)$$

Voltando agora a atenção para as etapas de funcionamento do modelo equivalente apresentado na Figura 4.6, pode-se observar que o indutor Lm é submetido à tensão de entrada V_{IN} (considerada constante) durante o intervalo de carga. Dessa forma, partindo-se da equação diferencial que rege o comportamento de um indutor ideal, pode-se determinar o comportamento de I_{Lm} neste intervalo, conforme demonstrado na Equação 22a.

$$v_{Lm}(t) = Lm \frac{di_{Lm}(t)}{dt} \rightarrow \frac{di_{Lm}(t)}{dt} = \frac{v_{Lm}(t)}{Lm} \quad (22a)$$

$$\xrightarrow{v_{Lm}(t)=V_{in}=cte} \Delta I_{Lm} = \frac{V_{in} \cdot \Delta t_1}{Lm} \quad (22b)$$

A Equação 22 estabelece que a corrente I_{Lm} varia de maneira linear no tempo. Utilizando-se este mesmo raciocínio, pode-se determinar a Equação 23, que fornece então a variação de I_{Lm} para o intervalo de descarga.

$$\Delta I_{Lm} = \frac{-\frac{(V_o - V_{in})}{k} \cdot \Delta t_2}{Lm} \quad (23)$$

De maneira semelhante ao intervalo de carga, a Equação 23 estabelece que a corrente I_{Lm} varia também de maneira linear no tempo para o intervalo de descarga. Entretanto, neste intervalo a variação da corrente é negativa.

A partir das conclusões obtidas através das Equações 22 e 23 e atribuindo-se nomes apropriados aos intervalos de tempo e às variações de corrente, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 4.7.

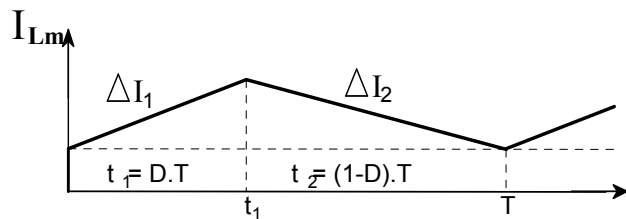


Figura 4.7 – Forma de onda da corrente I_{Lm} do modelo equivalente.

Na Figura 4.7, considerou-se a definição de ciclo de trabalho dada pela Equação 24.

$$D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{T} \quad (24)$$

Onde:

t_1 – Tempo de carga (Interruptor conduzindo);

t_2 – Tempo de descarga (Interruptor bloqueado);

T – Período de comutação;

D – Ciclo de trabalho.

Conforme a Figura 4.7 tem-se que a variação da corrente em L_m durante o intervalo de carga dever ser igual (em módulo) a variação da corrente no intervalo de descarga. Dessa forma, utilizando-se as Equações 22 e 23, juntamente com as definições estabelecidas na Figura 4.7, obtém-se a Equação 25.

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 \rightarrow \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L_m} = \frac{\frac{(V_o - V_i)}{k} (1 - D) \cdot T}{L_m} \quad (25)$$

A simplificação da Equação 25 é ilustrada através das Equações 26 a 29, obtendo-se assim a Equação 30 que fornece o ganho estático do conversor proposto.

$$V_i \cdot D = \frac{(V_o - V_i)}{k} (1 - D) \quad (26)$$

$$V_i \cdot D = \frac{V_o (1 - D)}{k} - \frac{V_i (1 - D)}{k} \quad (27)$$

$$V_i \left[D + \frac{(1 - D)}{k} \right] = \frac{V_o (1 - D)}{k} \quad (28)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{k \left[D + \frac{(1 - D)}{k} \right]}{(1 - D)} = \frac{K \cdot D + 1 - D}{(1 - D)} \quad (29)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D(k - 1) + 1}{(1 - D)} \quad (30)$$

Reorganizando a Equação 30, é possível encontrar uma expressão para o valor de k em função dos outros parâmetros, como mostra a Equação 31.

$$k = \frac{(1-D) \cdot (V_o - V_i)}{D \cdot V_i} \quad (31)$$

A partir da Equação 25, encontra-se a Equação 32, que permite determinar o valor de L_m .

$$L_m = \frac{D \cdot T \cdot V_i}{\Delta I_1} \quad (32)$$

4.5.3 Filtro Capacitivo do Conversor Elevador

Através da Figura 4.5, pode-se encontrar a tensão sobre o capacitor. Sabe-se que durante o intervalo $\Delta t = t_1$, o capacitor C_0 alimenta a carga com a corrente igual à I_0 . Dessa forma, a ondulação da tensão pode ser encontrada através das Equações de 33 a 35 e a capacitância (para cargas puramente resistivas) pela Equação 36.

$$I_{C_0} = C_0 \frac{dv_c}{dt} \quad (33)$$

$$I_0 = C_0 \frac{\Delta v_c}{\Delta t} \quad (34)$$

$$\Delta v_c = V_{C_M} - V_{C_m} I_C = I_0 \frac{\Delta t}{C_0} \quad (35)$$

$$C_0 = \frac{D \cdot I_0}{f \cdot \Delta v_0} \quad (36)$$

4.6 Dimensionamento e Simulação do Conversor Elevador

Considerando que o conversor elevador será ligado ao banco de baterias que fornecerá tensão média de 24 Vcc. É possível construir a Tabela 8, onde são apresentadas especificações necessárias para realizar o projeto do conversor elevador.

Tabela 8 – Especificações do conversor elevador.

ESPECIFICAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O PROJETO DO CONVERSOR ELEVADOR	
Parâmetro	Valor
V_{CEIN} – Tensão de entrada	24 V
V_{CEOUT} – Tensão de saída	311 V
P_{CEOUT} – Potência de Saída	300 W
η_{CE} – Rendimento do conversor	95%
I_{CEIN} – Corrente de entrada	13,16 A
ΔV_{CEOUT} – Ondulação de tensão no capacitor de saída	0,5% de V_{CEOUT}
ΔI_{INCE} – Ondulação de corrente na entrada	20% de I_{CEIN}
f_{CE} – Frequência de comutação	30 kHz
ΔV_{CEIN} – Ondulação de tensão na entrada	0,2% de V_{CEIN}
D_{CE} – Razão Cíclica	46%

Para dar início ao dimensionamento deve-se encontrar o valor da relação de transformação usando a Equação 37.

$$k = \frac{(1-D).(V_o - V_i)}{D.V_i} = 13,9 \quad (37)$$

O valor da indutância do primário é dado pela Equação 38.

$$L_m = \frac{D.T.V_i}{\Delta I_1} = 136,8\mu H \quad (38)$$

O valor da indutância do secundário é dado usando a Equação 39.

$$L_2 = L_m(k-1)^2 = 23,36mH \quad (39)$$

As características físicas do indutor acoplado do conversor elevador são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características físicas do indutor do Conversor Elevador.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO INDUTOR DO CONVERSOR ELEVADOR	
Núcleo do Entreferro	EE65/26 Thornton
Número de espiras no primário	12
Fio utilizado no primário	12 x 20 AWG
Número de espiras no secundário	164
Fio utilizado no secundário	2 x 23 AWG
Entreferro	0,3 mm
Densidade de fluxo utilizada	0,35 Tesla

O valor do capacitor de saída é dado pela Equação 40.

$$C_0 = \frac{D \cdot I_0}{f \cdot \Delta v_0} = 9,65 \mu F \quad (40)$$

O MOSFET utilizado foi o IFFB3207 da International Rectifier, o qual possui resistência e corrente de condução respectivamente $3.6 \text{ m}\Omega$, 180 A e tensão de bloqueio de 75 V [24].

O diodo boost D1 do conversor elevador utilizado foi o MUR4100E da On Semi, diodo ultra rápido que possui baixíssimo tempo de recuperação. A tensão de bloqueio desse diodo é de 1000 V e a corrente de condução 4 A [29].

O diodo grampeador DG utilizado foi o 50SQ100 da International Rectifier, diodo Schottky. A tensão de bloqueio desse diodo é de 100 V e a corrente de condução 5 A [30].

O circuito utilizado para simulação no PSPICE é apresentado na Figura 4.8.

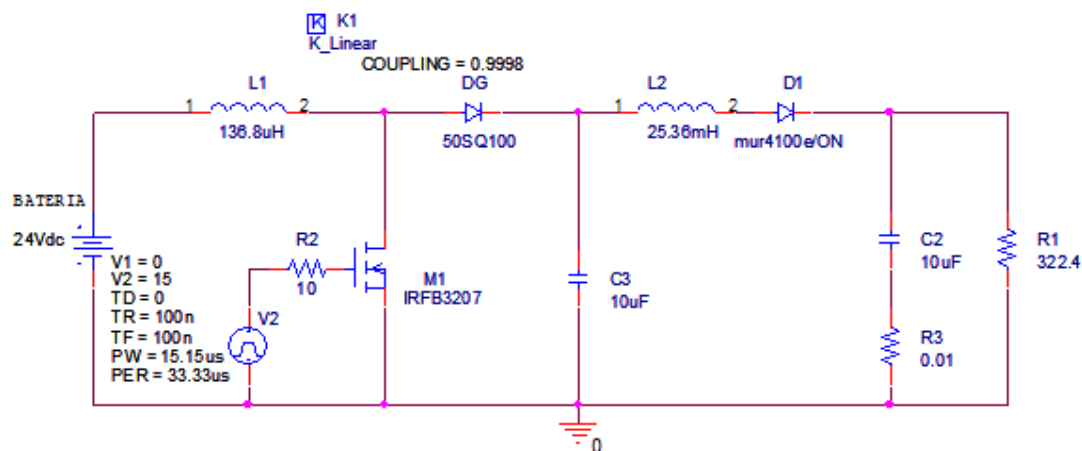


Figura 4.8 – Circuito de simulação do conversor elevador.

Os componentes utilizados na simulação são todos reais e o efeito da dispersão entre os enrolamentos do indutor acoplado foi adicionado com o intuito de obter-se o resultado mais próximo do real.

A seguir são apresentados os principais resultados de simulação do conversor para carga resistiva.

A Figura 4.9 apresenta a tensão sobre o interruptor do conversor elevador. Pode-se observar que existe um reduzido pico de tensão. Esse fato dar-se devido à indutância de dispersão dos enrolamentos do indutor acoplado.

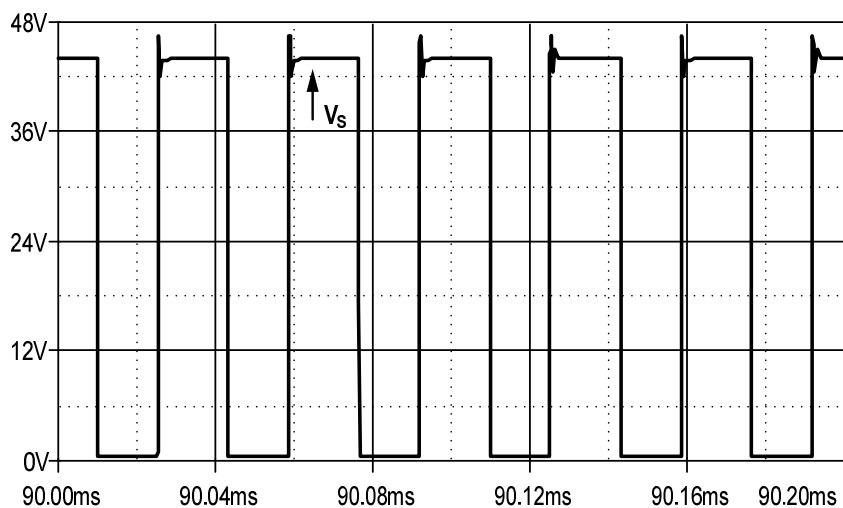


Figura 4.9 – Tensão sobre o interruptor.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam respectivamente os detalhes de tensão e corrente na comutação do interruptor.

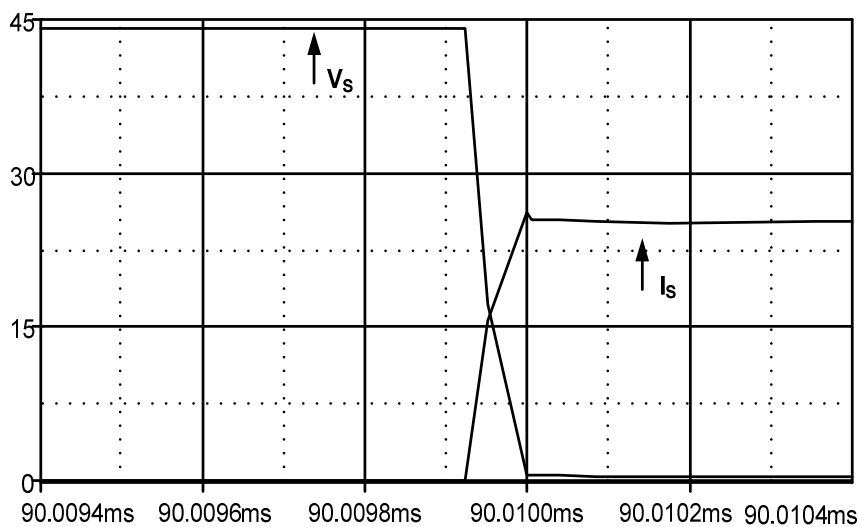


Figura 4.10 – Entrada em condução do interruptor do conversor elevador.

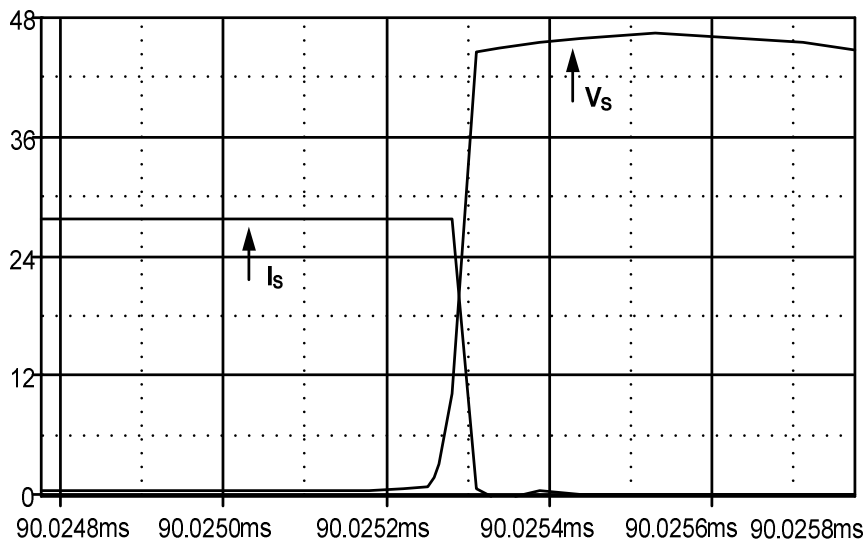


Figura 4.11 – Bloqueio do interruptor do conversor elevador.

A Figura 4.12 apresenta a tensão na saída do conversor elevador. Pode-se observar que existe uma pequena ondulação nessa tensão a qual é apresentada na Figura 4.13. Essa ondulação não traz prejuízo à carga, uma vez que a mesma ficou dentro do especificado.

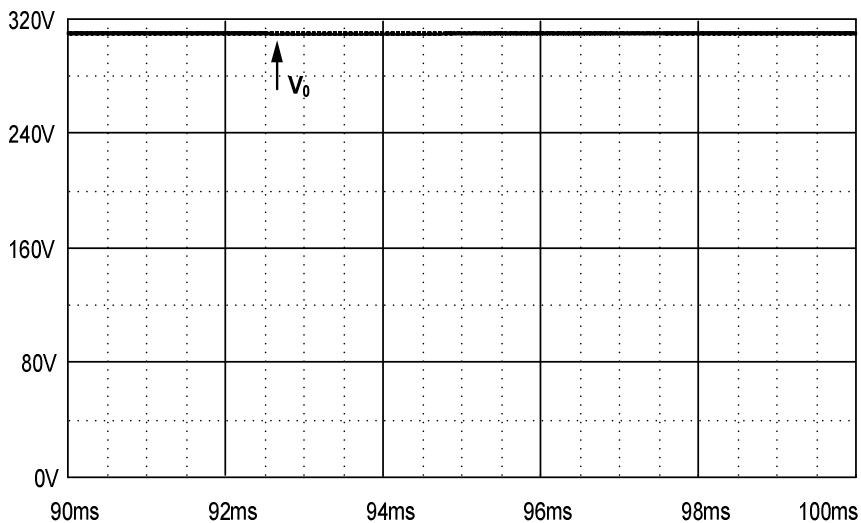


Figura 4.12 – Tensão na saída do conversor elevador.

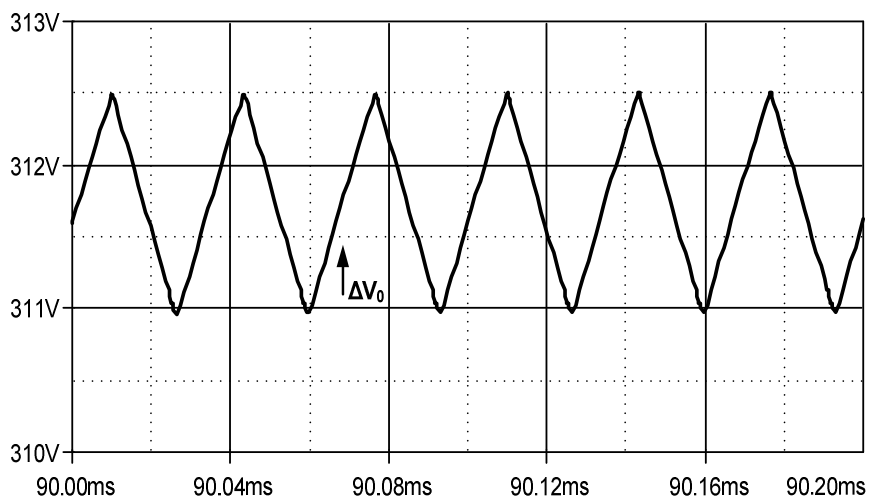


Figura 4.13 – Detalhe da ondulação da tensão na saída do conversor elevador

A Figura 4.14 apresenta a corrente na saída do conversor elevador.

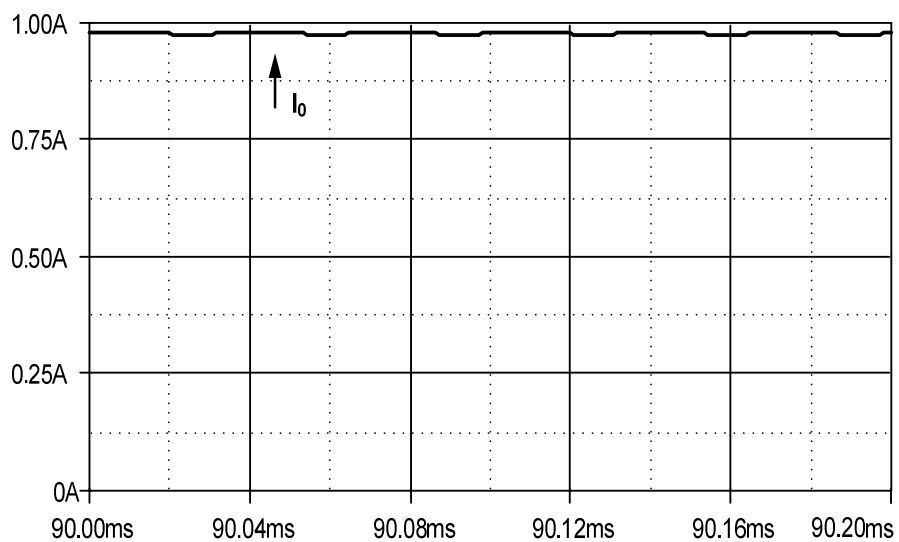


Figura 4.14 – Corrente na saída do conversor elevador.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi estudado o comportamento do conversor elevador, apresentado seu princípio de funcionamento, formas de onda, dimensionamento, projeto e resultados de simulação.

Foi realizada uma seleção da topologia a ser utilizada. Dentre as apresentadas foi selecionada a do *boost* de alto ganho com indutor acoplado. Sua escolha deu-se devido à elevada relação de transformação, reduzido número de componentes quando comparados a outras topologias de alto ganho e elevado fator de utilização do interruptor quando comparado a topologias clássicas não isoladas.

Através das simulações realizadas no PSPICE, foi possível observar que os resultados validaram o modelo matemático e o projeto do circuito apresentado nesse capítulo.

CAPÍTULO 5

5 Resultados Experimentais

Uma vez feitas às especificações dos conversores, as escolhas dos semicondutores, as montagens dos magnéticos e os projetos de controle é realizada a execução prática dos protótipos, agora são apresentados os resultados dos testes de bancada para validação das duas topologias.

A Figura 5.1 apresenta o esquema do circuito de potência do sistema proposto, que é composto pelo painel fotovoltaico, o carregador de baterias, o banco de baterias e o conversor elevador.

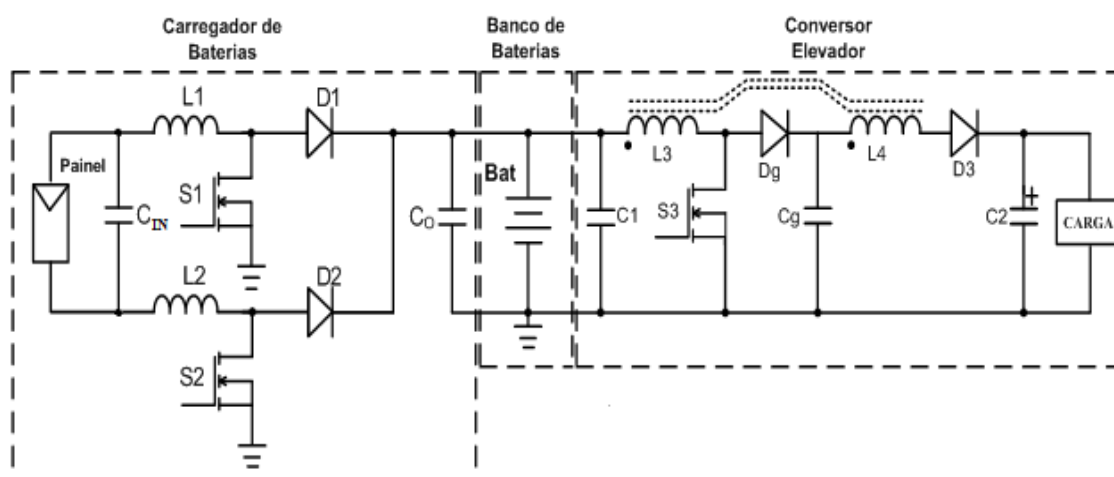


Figura 5.1 – Esquema do circuito de potência do sistema proposto.

O carregador de baterias possui as seguintes especificações:

Tensão de entrada	$V_{CBIN} = 17,6 \text{ V};$
Corrente de entrada	$I_{CBIN} = 23,32 \text{ A};$
Ondulação de corrente na entrada	$\Delta I_{CBIN} = 10\% \text{ da corrente de entrada};$

Ondulação de tensão na entrada	$\Delta V_{CBIN} = 0,1\%$ da tensão de entrada;
Tensão de saída	$V_{CBOUT} = 24 \text{ V};$
Potência de saída	$P_{CBOUT} = 390 \text{ W};$
Rendimento do conversor	$\eta_{CB} = 95\%;$
Ondulação de tensão na saída	$\Delta V_{CBOUT} = 0,05\%$ da tensão de saída;
Frequência de comutação	$f_{CB} = 30 \text{ kHz};$
Razão cíclica	$D_{CB} \approx 26,7\%.$

O conversor elevador possui as seguintes características:

Tensão de entrada	$V_{CEIN} = 24 \text{ V};$
Corrente de entrada	$I_{CEIN} = 26,31 \text{ A};$
Ondulação de corrente na entrada	$\Delta I_{CEIN} = 20\%$ da corrente de entrada;
Ondulação de tensão na entrada	$\Delta V_{CEIN} = 0,2\%$ da tensão de entrada;
Tensão de saída	$V_{CEOUT} = 311 \text{ V};$
Potência de saída	$P_{CEOUT} = 600 \text{ W};$
Rendimento do conversor	$\eta_{CE} = 95\%;$
Ondulação de tensão na saída	$\Delta V_{CEOUT} = 0,5\%$ da tensão de saída;
Frequência de comutação	$f_{CE} = 30 \text{ kHz};$
Razão cíclica	$D_{CE} = 45\%.$

5.1 O Protótipo

O sistema proposto é composto por dois conversores, carregador de baterias e conversor elevador. Os dois foram construídos separadamente, visando menor espaço por placa, maior rapidez de montagem e menor dificuldade de reparo quando apenas um deixar de funcionar. As fotografias dos protótipos são apresentadas a seguir.

5.1.1 Carregador de Baterias

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam respectivamente o circuito de potência e a fotografia do carregador de baterias. Os principais componentes são indicados na fotografia através de etiquetas.

O protótipo foi construído para suprir a potência máxima fornecida pelos painéis fotovoltaicos, ou seja, 390 W.

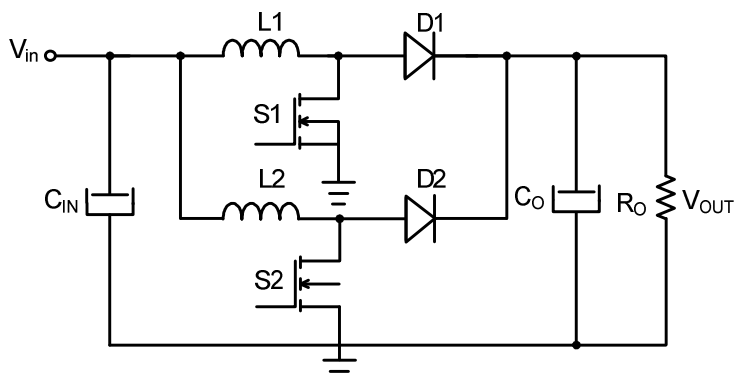


Figura 5.2 – Esquema do circuito de potência do carregador de baterias.

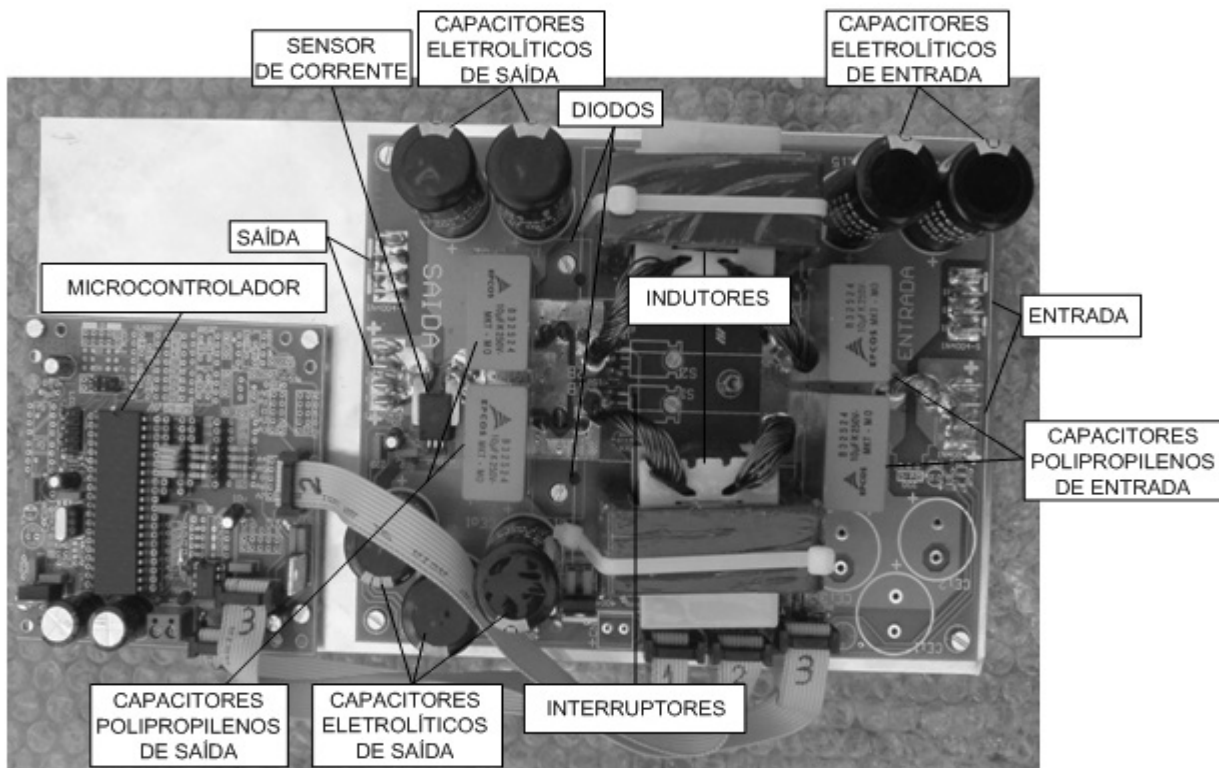


Figura 5.3 – Fotografia do carregador de baterias.

5.1.2 Conversor Elevador

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam respectivamente o circuito de potência e a fotografia do conversor elevador. Assim como no carregador de baterias, seus principais componentes são apresentados através de etiquetas.

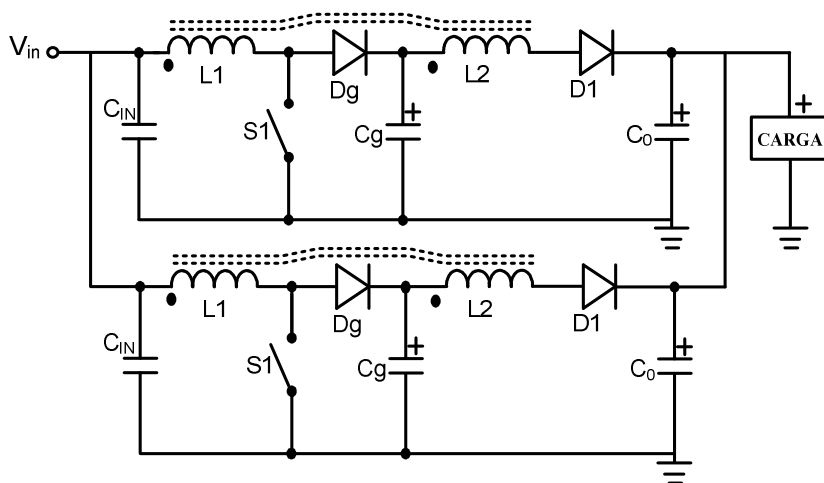


Figura 5.4 – Esquema do circuito de potência do conversor elevador.

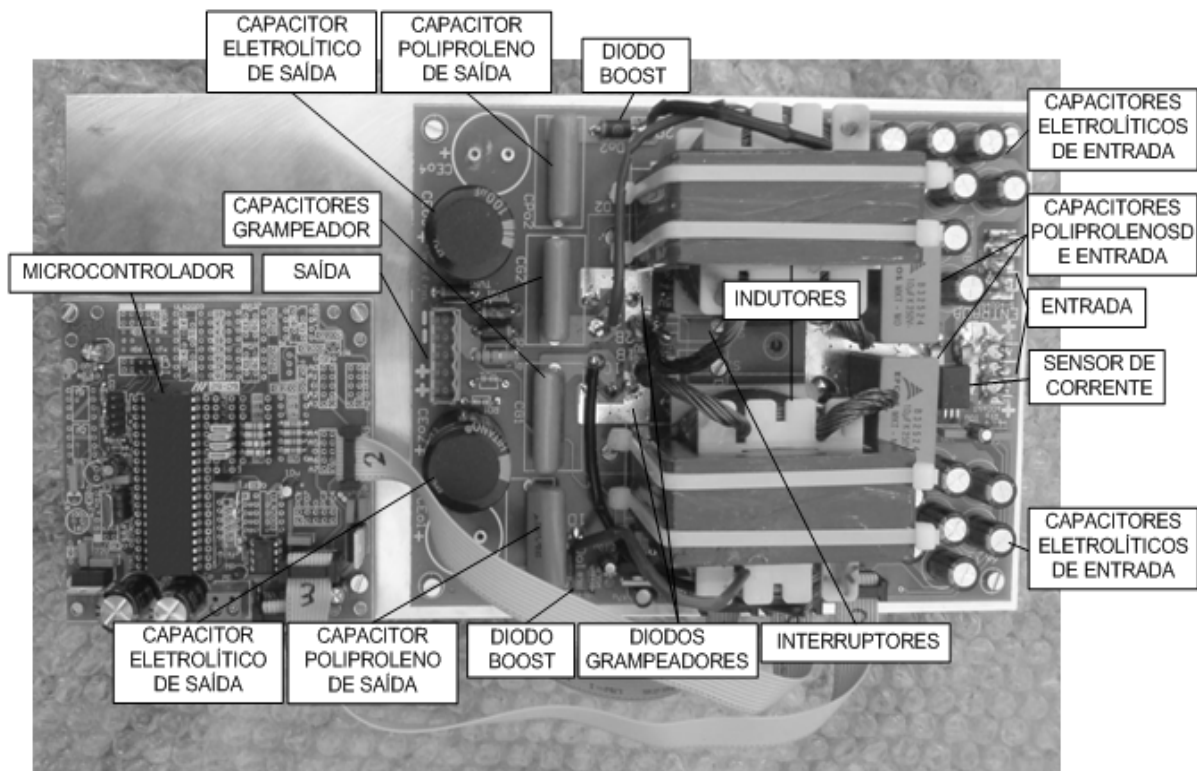


Figura 5.5 – Fotografia do conversor elevador.

O protótipo foi implementado para processar 600 W. Entretanto, de acordo com a Tabela 4, no momento em que todas as cargas estiverem ligadas ao mesmo tempo, será exigido do conversor somente 222 W.

5.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais são apresentados a seguir. Eles foram divididos em três etapas; carregador de baterias, conversor elevador e o sistema completo. Quando se tratando do sistema completo, são apresentados fotos do sistema instalado na escola.

5.2.1 Resultados do Carregador de Baterias

A seguir são mostrados os resultados extraídos do protótipo do carregador de baterias.

A carga utilizada foi um banco de baterias, composta por quatro unidades, cada uma com 12 V e 150 A. Foram feitos dois arranjos cada um com duas baterias em paralelo totalizando em cada arranjo 12 V e 300 A. Em seguida os dois arranjos foram conectados em série formando o banco de baterias final com tensão do barramento 24 V e corrente 300 A.

A tensão e a corrente de entrada no carregador de baterias, para condições nominais de operação, são apresentadas na Figura 5.6.

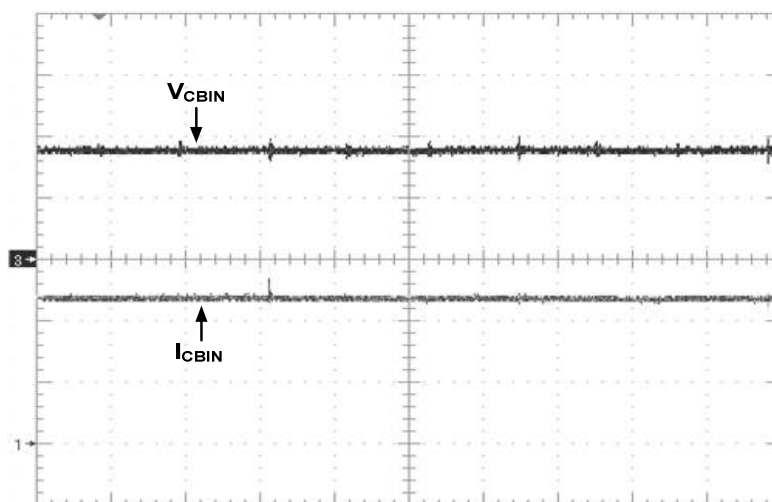


Figura 5.6 – Tensão na entrada do carregador de baterias (10 V/div; 10 μ s/div) e corrente na entrada do carregador de baterias (10 A/div; 10 μ s/div).

A Figura 5.7 apresenta a tensão de entrada e a de saída do carregador de baterias, onde é possível observar que V_{CBOUT} e V_{CBIN} possuem valores aproximados 24 V e 17 V respectivamente.

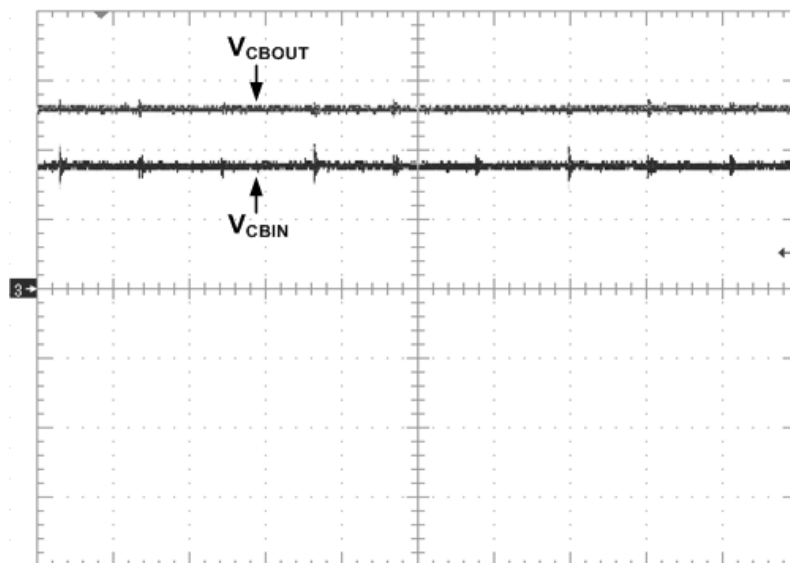


Figura 5.7 – Tensão na entrada do carregador de baterias (10 V/div; 10 μ s/div) e tensão na saída do Carregador de baterias (10 V/div; 10 μ s/div)

A Figura 5.8 apresenta a tensão dreno-source no interruptor S1 (V_{S1}) e a corrente no indutor L1 (I_{L1}) do carregador de baterias. Pode-se observar através da corrente no indutor L1 que o circuito está operando no modo de condução contínua.

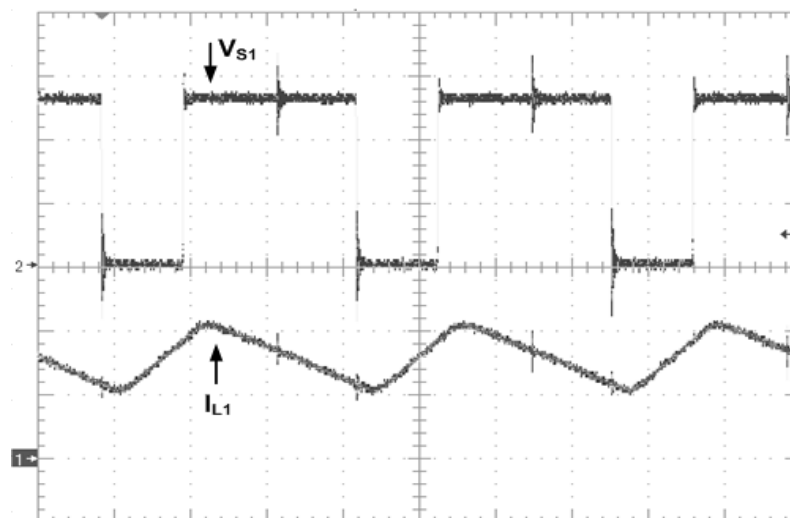


Figura 5.8 – Tensão no interruptor S1 (10 V/div; 10 μ s/div) e corrente no indutor L1 (5 A/div; 10 μ s/div).

A Figura 5.9 apresenta a tensão e a corrente na saída do carregador de baterias. Os valores obtidos foram respectivamente 25 V e 16 A. Pode-se observar que o carregamento das baterias será realizado com baixa ondulação.

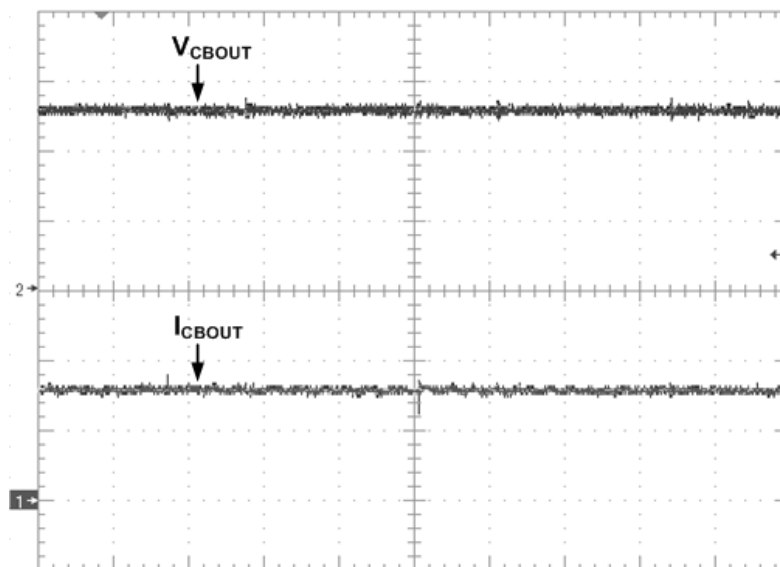


Figura 5.9 – Tensão na saída do carregador de baterias (10 V/div; 10µs/div) e corrente na saída do carregador de baterias (10 A/div; 10µs/div).

A Figura 5.10 apresenta a curva de rendimento do carregador de baterias de a vazio até plena carga.

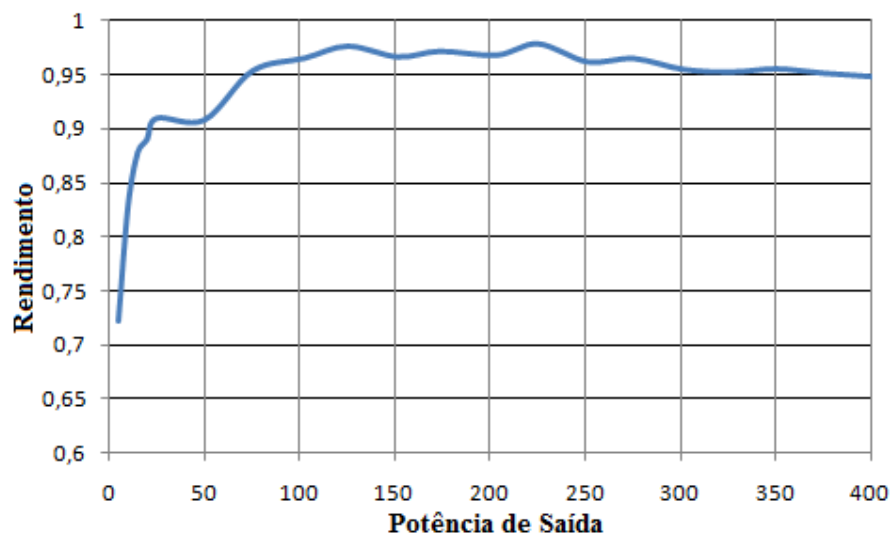


Figura 5.10 – Curva de rendimento do carregador de baterias.

5.2.2 Resultados do Conversor Elevador

A seguir são mostrados os resultados extraídos do protótipo do conversor elevador.

Foi utilizado como carga um reostato com potência e impedância 3000 W/600 Ω respectivamente e três lâmpadas fluorescentes compactas com 23 W cada.

A tensão e a corrente de entrada no conversor elevador são apresentadas na Figura 5.11.

Pode-se observar que a ondulação é mínima.

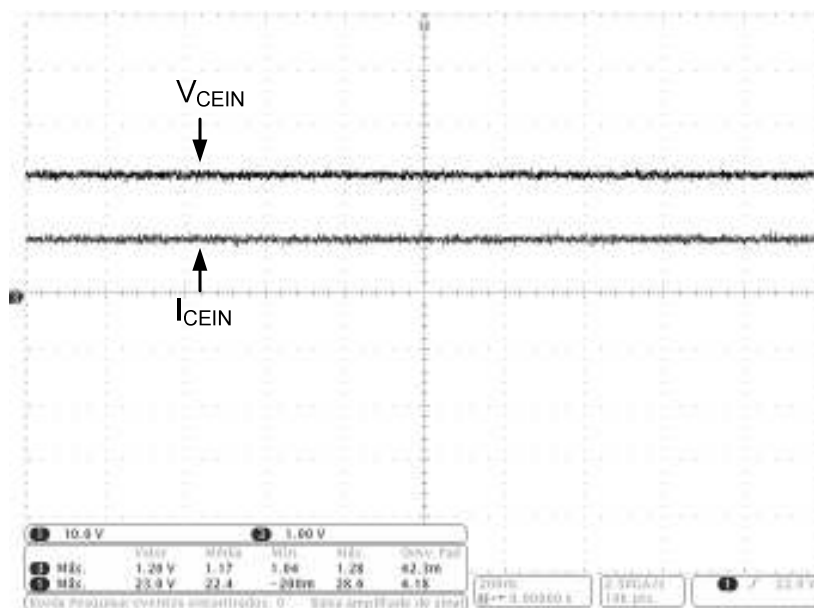


Figura 5.11 – Tensão na entrada do conversor elevador (10 V/div; 200ns/div) e corrente na entrada do conversor elevador (10 A/div; 200ns/div).

A Figura 5.12 apresenta a tensão dreno-source no interruptor S3 (V_{S3}) e a corrente no indutor L3 (I_{L3}). Pode-se notar que a variação de corrente no indutor ocorre de maneira linear, conforme demonstrado no equacionamento apresentado. Pode-se ainda observar um sobre-sinal na tensão do interruptor. Esse fato ocorre devido à ressonância que ocorre entre a capacitância do interruptor e a indutância de dispersão do indutor acoplado. Pode-se também observar que existem oscilações na corrente I_{L3} , que ocorrem no momento em que o interruptor passa a conduzir. Este comportamento pode ser atribuído às componentes parasitas de indutância e capacitância presentes no layout do protótipo.

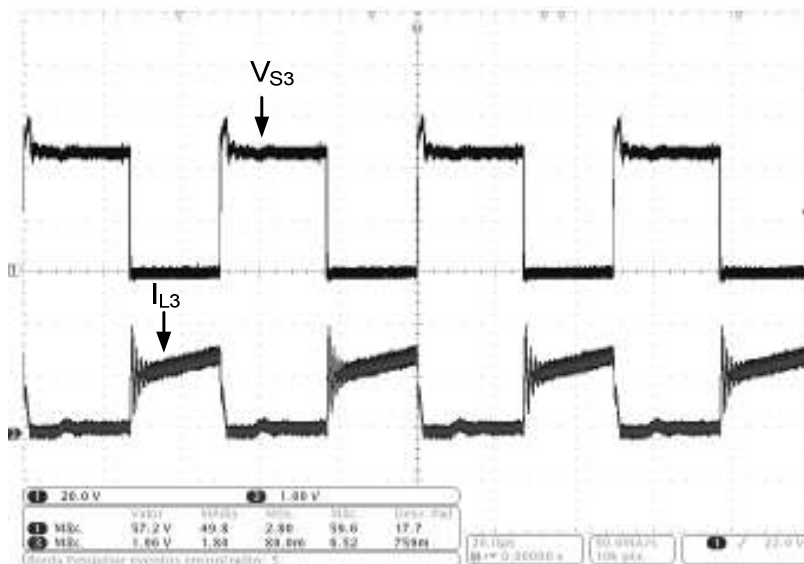


Figura 5.12 – Tensão no interruptor S3 (20 V/div; 20 μ s/div) e corrente no indutor L3 (10 A/div; 20 μ s/div).

A Figura 5.13 apresenta a corrente no primário e secundário do indutor acoplado do conversor elevador, I_{L3} e I_{L4} . Conforme já esperado, é possível observar que I_{L4} é descontínua. Também é possível ver a variação linear de I_{L4} durante a segunda etapa de operação (descarga do indutor acoplado).

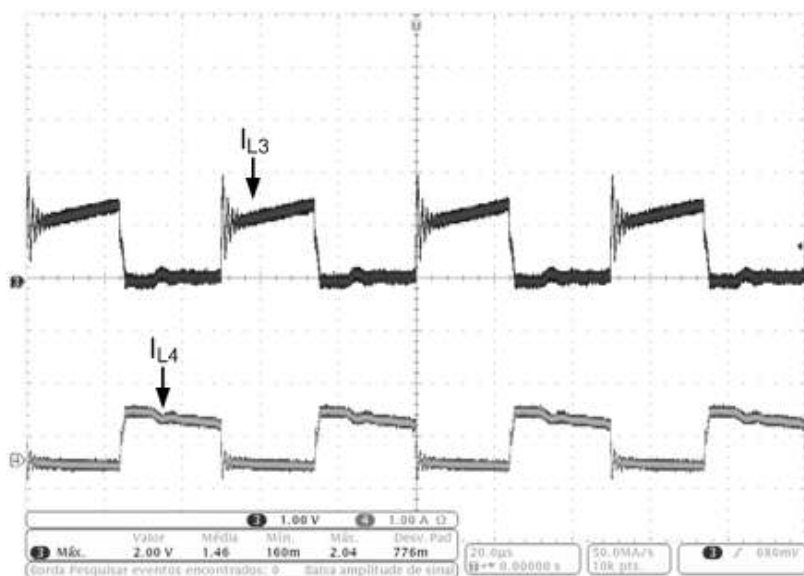


Figura 5.13 – Corrente no primário do indutor acoplado do conversor elevador (10 A/div; 20 μ s/div) e corrente no secundário do indutor acoplado do conversor elevador (10 A/div; 20 μ s/div).

A Figura 5.14 apresenta a tensão e a corrente na saída do conversor elevador. Pode-se observar que a ondulação é mínima. V_{CEOUT} e I_{CEOUT} possuem valores aproximados 311 V e 1,2 A respectivamente.

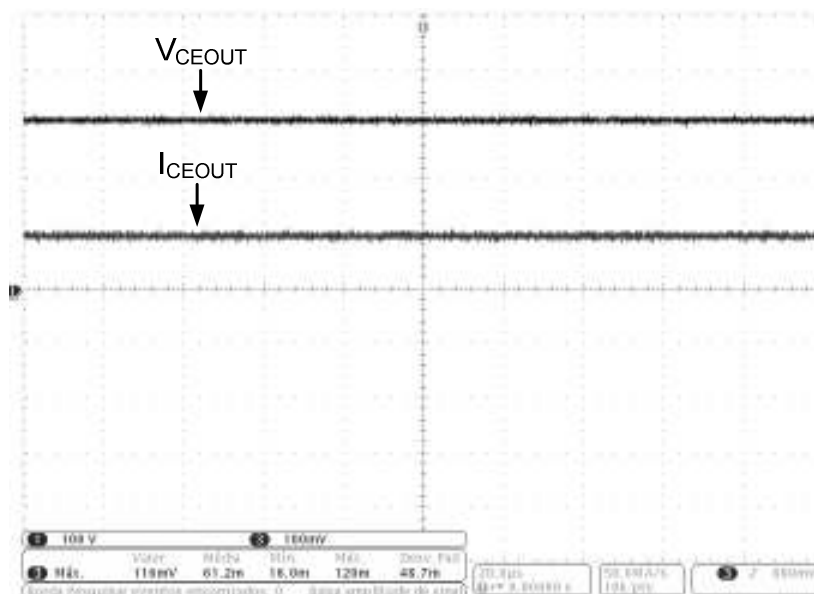


Figura 5.14 – Tensão na saída do conversor elevador (100 V/div; 20 μ s/div) e corrente na saída do conversor elevador (1 A/div; 20 μ s/div).

A Figura 5.15 apresenta a curva de rendimento do conversor elevador para uma potência de saída de 350 W.

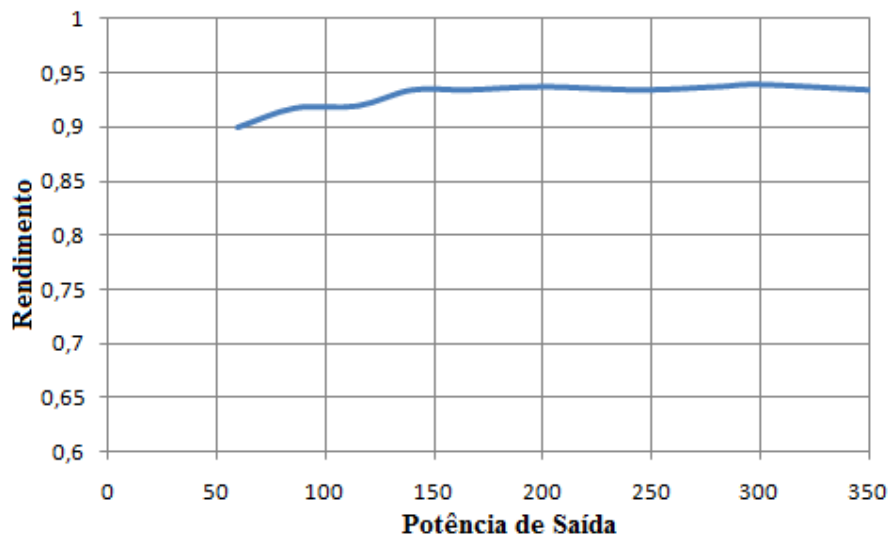


Figura 5.15 – Curva de rendimento do conversor elevador.

5.2.3 O Sistema Completo

A Figura 5.16 apresenta a estrutura de fixação dos painéis fotovoltaicos e o compartimento destinado aos conversores e as baterias.



Figura 5.16 – Estrutura para receber o sistema fotovoltaico.

A Figura 5.17 apresenta os painéis fotovoltaicos. Os três foram conectados em paralelo.



Figura 5.17 – Painéis fotovoltaicos.

A Figura 5.18 apresenta o sistema completamente instalado: os painéis, as baterias e os conversores.



Figura 5.18 – Sistema completo instalado.

A Figura 5.19 apresenta o sistema funcionando e alimentando três tipos de cargas; lâmpadas PL, leitor de DVD e um televisor LCD.



Figura 5.19 – Funcionamento do sistema.

5.3 Considerações Finais

Ao final dos testes realizados pôde-se concluir que os resultados experimentais foram satisfatórios. É possível afirmar que os valores encontrados confirmam os valores dimensionados e simulados. Foram apresentados os esforços de tensão e corrente para os interruptores e os mesmos não ultrapassaram o máximo permitido.

O interruptor S3 do conversor elevador apresentou um sinal de sobretensão, ocasionado pela a indutância de dispersão do indutor acoplado, esse problema pode ser reduzido com a correta confecção desse indutor.

O máximo rendimento do carregador de baterias chegou a 98% e do conversor elevador a 94%. Rendimentos esses que foram considerados satisfatórios para o projeto.

O sistema foi capaz de alimentar diversos tipos de equipamentos eletrônicos entre eles; carregador de celular, carregador de notebook, lâmpadas fluorescentes compactas, leitor de DVD e televisor LCD.

Conclusão Geral

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para alimentar cargas rurais em corrente contínua, comumente alimentadas em corrente alternada. Houve melhora na eficiência quando comparado aos sistemas em corrente alternada devido a não utilização do inversor. A maior eficiência pode ser explicada através do rendimento do conversor elevador CC/CC que é superior a de inversores tanto a plena carga como a vazio.

No Capítulo 1 foi feita uma análise da situação atual do atendimento de energia elétrica no Brasil. Foi constatado que cerca de dois milhões de domicílios rurais ainda não possuem fornecimento de energia elétrica, o que corresponde a cerca de 80% do total nacional de exclusão elétrica. Esses domicílios geralmente estão situados em locais de difícil acesso, distantes do sistema de distribuição convencional e geralmente concentrados em pequenas quantidades de consumidores. Dessa forma tornando-se economicamente inviável para as concessionárias realizarem esse atendimento mediante extensão da rede convencional.

Com base nos fatores citados acima, chegou-se a conclusão que para esse tipo de atendimento, os sistemas fotovoltaicos se tornam bastante atrativos. Especialmente quando o mesmo possui tecnologia nacional, onde os custos são reduzidos.

No Capítulo 2 foram apresentadas as configurações de sistemas fotovoltaicos, assim como o completo dimensionamento do sistema proposto. Foi possível observar que para a localidade onde foi instalado o sistema, a configuração que se mostrou mais atrativa foi a que operava com corrente contínua e possuía conversor elevador CC/CC de alto ganho de tensão para alimentação das cargas, uma vez que a comunidade fica situada afastada dos centros urbanos e o acesso a cargas específicas é complicado.

De acordo com as necessidades do projeto e as regulamentações da ANEEL o sistema foi dimensionado passando a ser composto por; três painéis fotovoltaicos (KC130 T – 130

Wp), um carregador de baterias de 390 W, um banco de baterias composto por quatro unidades (cada uma com 12 V e 150 A) e um conversor elevador de 600 W.

No Capítulo 3 foi realizado o estudo da topologia proposta para o carregador de baterias. Foram apresentados seu princípio de funcionamento, etapas de operação, dimensionamento, projeto e resultados de simulação. Através dos resultados de simulação foi possível comprovar que o conversor realmente pode ser dimensionado considerando a equivalência com dois conversores boost clássico operando em paralelo com defasamento de 180° entre o comando dos interruptores.

No Capítulo 4 foi realizado o estudo e a seleção da topologia utilizada para o conversor elevador. A topologia escolhida para ser implementada foi o boost de alto ganho com indutor acoplado. A escolha deu-se devido sua elevada relação de transformação e menor número de componentes a ser utilizado quando comparado a outras topologias de alto ganho. Foram apresentados o princípio de funcionamento, etapas de operação, dimensionamento, projeto e resultados de simulação para a topologia escolhida.

O Projeto se mostrou satisfatório atendendo as condições esperadas. Os conversores propostos (carregador de baterias e conversor elevador) foram capazes de desempenhar suas funções como desejado e os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios.

O protótipo final é composto por dois conversores, os quais foram construídos separados, visando menor espaço por placa, maior rapidez de montagem e menor dificuldade de reparo quando apenas um deixar de funcionar.

O carregador de baterias, operando com potência nominal, apresentou rendimento máximo de 98%. Já o conversor elevador apresentou rendimento um pouco inferior, ficando em 94%.

Para a instalação do sistema final em campo foi realizado um estudo da estrutura a ser utilizada (não incluso nesse trabalho). Optou-se por uma que utilizasse dois postes de

concreto, onde em seu topo foram alocados os painéis fotovoltaicos. Entre os postes foi feito um compartimento fechado e ventilado no intuito de receber e proteger os conversores e as baterias.

O sistema encontra-se instalado na escola no município de Uruçuí-PI desde outubro de 2009. Até o presente momento o protótipo não necessitou de nenhuma manutenção.

Como trabalho futuro pode-se sugerir o estudo e a comparação entre a topologia proposta neste trabalho para o conversor elevador e a topologia boost com a célula de três estados proposta por Grover [33]. Deve-se levar em consideração a eficiência e a quantidade de componentes ativos e passivos.

Ainda em relação a trabalhos futuros pode-se sugerir a realização de um estudo de controle liga/desliga uma das células do conversor elevador no momento em que a carga conectada a sua saída possuir baixa potência no intuito de obter maior rendimento.

Referências

- [1] <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/informativos.asp>. Acessado em 18 de janeiro de 2010.
- [2] DOU. Decreto nº. 4.873. Brasília: Diário Oficial da União de 11 de novembro de 2003.
- [3] DOU. Decreto nº. 6.442. Brasília: Diário Oficial da União de 25 de abril de 2008.
- [4] MOCELIN, A. R.. Implantação e Gestão de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares: Resultados Operacionais de um Projeto Piloto de Aplicação da Resolução ANEEL N° 83/2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – USP, São Paulo, 2007.
- [5] MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. Pré-dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de Caso Sobre o Edifício Sede do CREA-SC. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, São Paulo-SP, julho de 2004.
- [6] JÚNIOR, E. M. S.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; Cruz, C. M. J. Photovoltaic System for Supply Public Illumination in Electrical Energy Demand Peak. 19TH IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC2004, California, Estados Unidos da América, v. 3, p. 1501-1506, fevereiro de 2004.
- [7] LIMA, A. S. Comparação de Dois Conversores Boost para Aplicação em Carregadores de Baterias de um Sistema Fotovoltaico Autônomo Aplicando Princípios da Engenharia de Valor. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFC, Fortaleza, 2008.
- [8] BORGES, E.; KLAUS, W.; MONTEIRO, C.; SCHWAB, T. Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares – Teste em Campo de um Modelo Sustentável de Eletrificação Rural. II Congresso Brasileiro de Eficiência energética, Vitoria-ES, setembro de 2007.
- [9] SILVA, F. S. F.; ALENCAR, A. F.; SOUSA, S. K.; XIMENES, S.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; CRUZ, C.; SÁ JÚNIOR, E. M.; ENDROLATH, L.; FILHO, J. S.

- PV System to Supply Lighting and Small Electronic Equipments of an off-Grid Rural School. RIO 9 - World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro-RJ, março de 2009.
- [10] ALENCAR, A. F.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; XIMENES, S; CRUZ, C.; SÁ JÚNIOR, E. M.; SILVA, F. S. F. Off-Grid PV System to Supply a Rural School on DC Network. 10° International Conference on Renewable Energies and Power Quality - (ICREPQ'10), Granada, Espanha, março de 2010.
- [11] ANEEL. Resolução ANEEL N° 83. Diário Oficial de 24 de Setembro, 2004.
- [12] ANEEL. Resolução ANEEL N° 927. Diário Oficial de 29 de Maio, 2007.
- [13] SANTOS, C. J. D. Aplicação de Conversores Matriciais em Sistemas Fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- [14] <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar2.html>. Acessado em 03 de fevereiro de 2010.
- [15] <http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp268.asp>. Acessado em 03 de fevereiro de 2010.
- [16] ZILLES, R.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M.C. Avaliação dos Sistemas Fotovoltaicos Instalados nas Residências dos Moradores da Ilha do Cardoso. Encontro de Energia do Meio Rural. Campinas – SP, 2003.
- [17] BORGES, E.L.P.; CARVALHO, C.M.; OLIVIERI, M.M.A. “Projeto Piloto de Xapuri” Relatório Final. Eletrobrás 2008, Vol. 1, PP. 44-47
- [18] SANTOS, R. R.; ZILES, R. Eletrificação de localidades isoladas: centros fotovoltaicos de carga de bateria e sistemas fotovoltaicos domiciliares. Encontro de Energia no Meio Rural. São Paulo – SP, maio de 2008.
- [19] SÁ JÚNIOR, E. M. Sistema fotovoltaico para iluminação Pública em horário de ponta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFC, Fortaleza, 2004.

- [20] O'LOUGHLIN, M. An Interleaved PFC Pre-regulator for High-Power Converters. Texas Instruments. EDN, 30 de março de 2006.
- [21] MARTINS, D. C.; BARBI, I. Conversores CC-CC Básicos não Isolados. Segunda edição revisada. Florianópolis, Edição do Autor, 2006.
- [22] PERAÇA, M. T. Conversores CC-CC Isoladores para Aplicação em Equipamentos de refrigeração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFSC, Florianópolis, 2002.
- [23] <http://www.kyocerasolar.com.br/site/arquivos/produtos/68.pdf>. Acessado em 08 de janeiro de 2010.
- [24] IRFB3207 HEXFET Power MOSFET. Datasheet, International Rectifier.
- [25] 30CPQ060 Diodo Schottky. Datasheet, International Rectifier.
- [26] SKVARENINA, T. L. The Power Electronics Handbook, CRC Press LLC, Boca, ISBN 08493-7336-0, Raton - Florida, 2002.
- [27] ZHAO, Q. Performance Improvement of Power Conversion by Utilizing Coupled Inductors. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Blacksburg, Virginia, fevereiro, 2003.
- [28] SILVA, F. S. F.; ALENCAR, A. F.; SOUSA, S. K.; XIMENES, S.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; CRUZ, C.; SÁ JÚNIOR, E. M. High Gain Dc-Dc Boost Converter With A Coupling Inductor. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP, Bonito-MS, setembro de 2009.
- [29] MUR4100 Diodo Ultra rápido. Datasheet, On Semi.
- [30] 50SQ100 Diodo Schottky. Datasheet, International Rectifier.
- [31] TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
- [32] ATMEL. Datasheet 8-bit AVR Microcontroller ATmega32. Manual Técnico da

Atmel, março de 2005.

- [33] BASCOPE, G. V. T. Nova Família de Conversores CC/CC PWM não Isolados Utilizando Células de Comutação de Três Níveis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Florianópolis-SC, dezembro 2001.
- [34] SANTELO, T. N. Célula de Comutação de Três Estados Aplicada ao Pré-regulador Boost de Estágio Único e Elevado Fator de Potência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Ilha Solteira-SP, setembro 2006.
- [35] MESQUITA, R. P.; SOUZA, T. M.; GASTALDI, A. F. Comparativo Entre Energia Solar Fotovoltaica Versus Extensão De Rede, Aplicado Em Caso Concreto De Uma Comunidade Carente E Remota. An. 5. Enc. Energ. Meio Rural 2004.
- [36] ZHAO, Q. High-Efficiency, High Step-Up DC-DC Converters. IEEE Transaction on Power Electronics. Volume 18, nº. 1, january 2003, PP. 65-73.
- [37] GROVER, V. T. B. et al. A High Step-Up DC-DC Converter Based on Three-State Switching Cell. IEEE ISIE 2006, july 9-12, Canada, pp. 998-1003.

APÊNDICE A

(Algoritmo dos Conversores)

Declaração da variáveis

```
#define PWM_PER 300

#define PWM_MIN 20

#define PWM_MAX 290

#define IBATMAX 150

#define IBAT_SHUTDOWN 200

#define VBAT_MAX 300

#define VBAT_MIN 100

#define VPAN_MIN 80

#define VBAT_HIST_HIGH 276

#define VBAT_HIST_LOW 260
```

MPPT

```
void MPPT(void)

{

    static int MIbat_ANT=0;

    static unsigned char dir=1;

    static int SIBAT=0;

    static int MPPT_camo=0;

    int MPPT_IBAT=0;

    if(MPPT_camo < 3){

        SIBAT = SIBAT + MIbat;

        MPPT_camo++;
```

```

}
else{
    MPPT_IBAT = (SIBAT / MPPT_camo);
    SIBAT = 0;
    MPPT_camo=0;
if(MIbat < IBATMAX){
    if(dir==1){
        if(MIbat >= MIbat_ANT){
            if(Yout < PWM_MAX){Yout++;dir = 1;}else dir = 0;
        }
        else{ if(Yout>PWM_MIN){Yout--;dir = 0;} else dir = 1;}
    }
    else{
        if(MIbat >= MIbat_ANT){
            if(Yout>PWM_MIN){Yout--;dir = 0;}else dir = 1;
        }
        else{ if(Yout < PWM_MAX){Yout++;dir = 1;}else dir = 0; }
    }
}
else
{
    Yout--;
}
MIbat_ANT = MIbat;
PWM_ATUAL = Yout;

```

```

configura_pwm();
    } // close else if(MPPT_camo < 20){
}

```

Protecao por de histese da bateria

MVbat: leitura de tensao na bateria;

Hister: flag de status do controlador de histere

PWM_ATUAL: variavel de controle da chave do boost

MPPT: executa o algoritmo de MPPT dos paineis (tb atualiza o PWM).

```
#define VBAT_HIST_HIGH 276
```

```
#define VBAT_HIST_LOW 260
```

```

if(Hister==0){
    if(MVbat <= VBAT_HIST_HIGH){ // Se vbat for inferior a 27,6 V
        MPPT();
    }
    else{
        Hister = 1;
    }
}
else{
    Yout=0; // desliga as chaves (duty PWM=0)
    PWM_ATUAL = Yout;
    configura_pwm();
    if(MVbat <= VBAT_HIST_LOW)Hister = 0;
}

```

Controlador PI do ELEVADOR

```
//===== PID CONTROLLER =====

#define PID_Kp_INI          3

#define PID_Ki_INI          3

#define PID_DIV_SI          20

#define PID_DIV_KP          10

#define PID_MAX_OUT        PWM_MAX

#define PID_MIN_OUT        PWM_MIN

#define PID_MAX_SI          (PID_DIV_SI*PID_MAX_OUT)

#define PID_MIN_SI          PWM_MIN

int PID_Error;              // Error

int PID_SI=0;              // Integral Accumulator

int PID_Ki=PID_Ki_INI;     // Integral Gain

int PID_Kp=PID_Kp_INI;     // Proportional Gain

int PID_Out;              // PID Output

int PID(int Ref, int Feed)

{

    PID_Error = Ref - Feed;

    if(PID_Error < -30)PID_Error = -30;

    if(PID_Error > 30)PID_Error = 30;

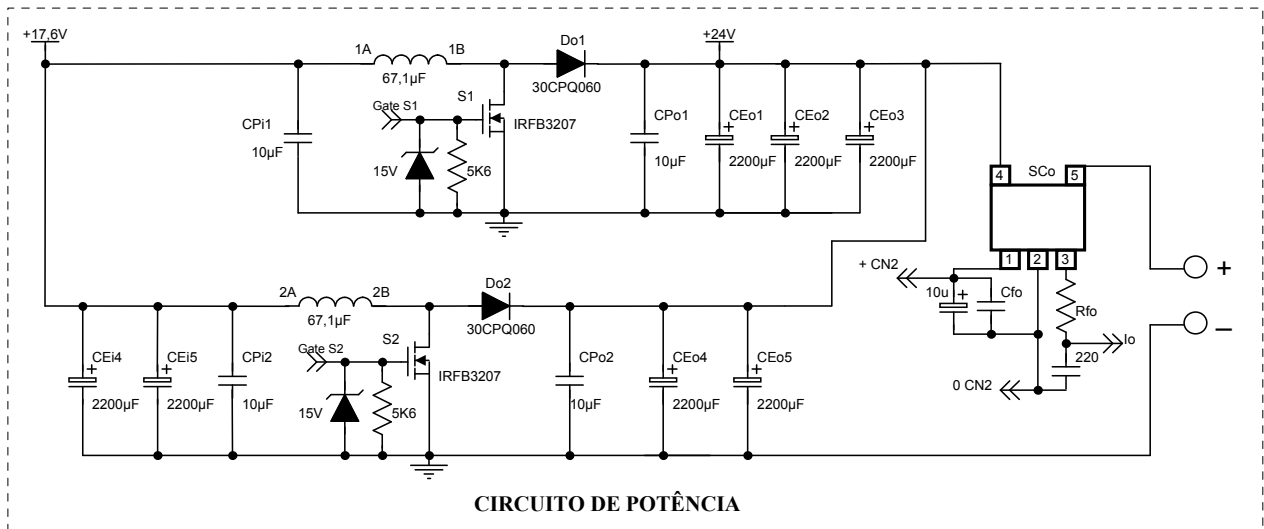
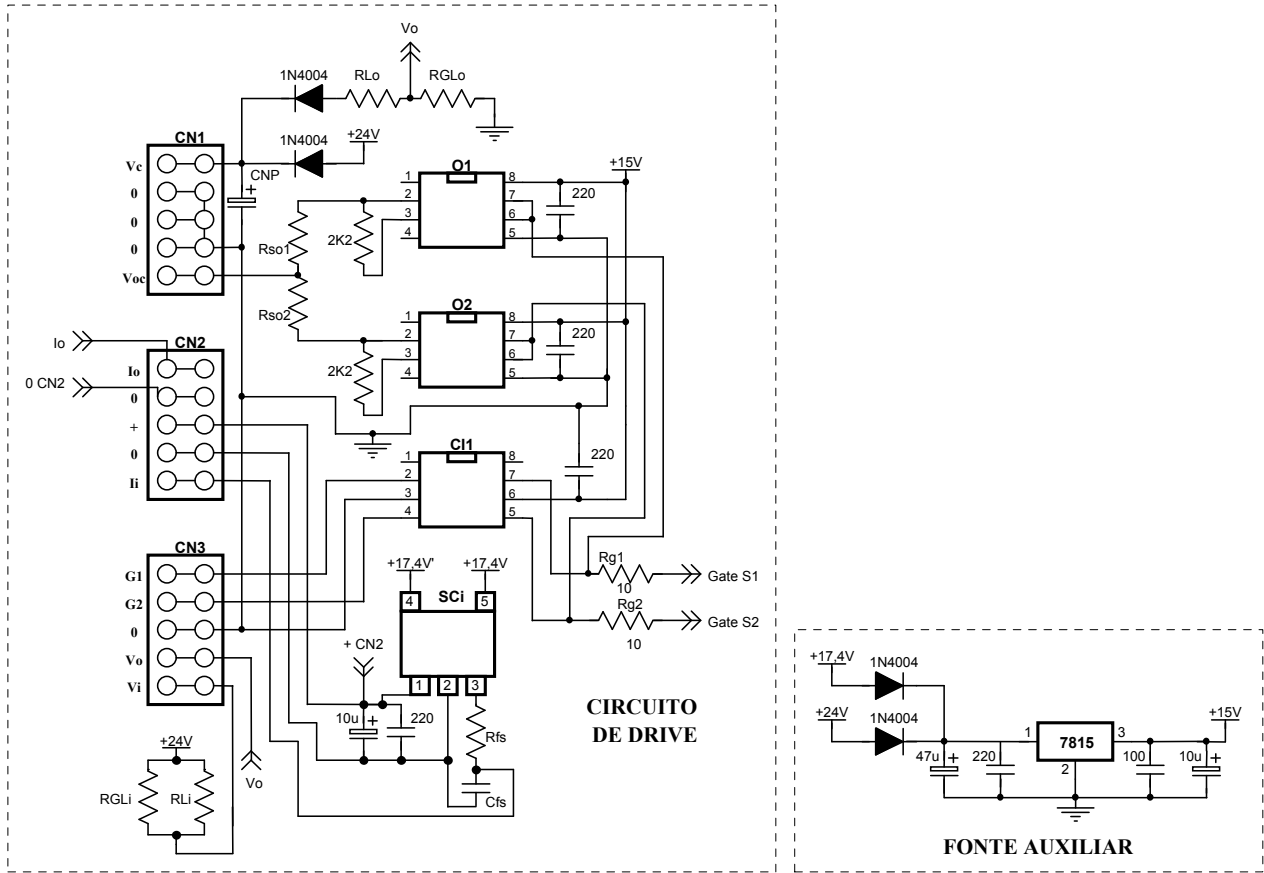
    if(PID_Error <= -10)PID_SI = PID_SI + (4*PID_Error*PID_Ki);
```

```
else          PID_SI = PID_SI + PID_Error*PID_Ki;

if(PID_SI>PID_MAX_SI)PID_SI=PID_MAX_SI;
if(PID_SI<PID_MIN_SI)PID_SI=PID_MIN_SI
PID_Out = ((PID_Error*PID_Kp)/PID_DIV_KP) + (PID_SI/PID_DIV_SI);
if(PID_Out>=PID_MAX_OUT) PID_Out = PID_MAX_OUT;
if(PID_Out<=PID_MIN_OUT) PID_Out = PID_MIN_OUT;
return(PID_Out);
}
```

APÊNDICE B

(Esquemático do Carregador de Baterias)



APÊNDICE C

(Esquemático do Conversor Elevador)

