

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
ENGENHARIA ELÉTRICA**

LEONARDO CATAFESTA

**PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM
EMBARCAÇÕES DO TIPO CATAMARÃ**

JOINVILLE – SC

2012

LEONARDO CATAFESTA

**PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM
EMBARCAÇÕES DO TIPO CATAMARÃ**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Yales Rômulo de Novaes

JOINVILLE – SC

2012

LEONARDO CATAFESTA

**PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM
EMBARCAÇÕES DO TIPO CATAMARÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica - DEE, Centro de Ciências Tecnológicas - CCT, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Bacharel.

Banca Examinadora

Orientador: _____
Yales Rômulo de Novaes, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: _____
Alessandro Luiz Batschauer, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: _____
Sérgio Vidal Garcia Oliveira, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

**JOINVILLE, SC
DEZEMBRO 2012**

RESUMO

CATAFESTA, Leonardo. **Processamento Eletrônico de Energia Solar Fotovoltaica em Embarcações do Tipo Catamarã**. 2012. TCC (Bacharelado em Engenharia Elétrica – Área: Processamento de Energia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

Este trabalho de conclusão de curso realiza a análise do sistema elétrico de uma embarcação do tipo catamarã da equipe SolarUDESC, participante da competição nacional Desafio Solar Brasil (DSB), e busca trazer melhorias no aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

O sistema elétrico consiste em dois conversores CC-CC que são responsáveis pelo gerenciamento de energia solar fotovoltaica. O primeiro é responsável por realizar o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dos painéis fotovoltaicos e carregar as baterias do sistema.

O segundo conversor CC-CC controla a energia fornecida para o motor da embarcação.

São realizados também estudos das características básicas de painéis solares, estudos de conversores CC-CC e compreensão dos métodos principais de.

Depois de realizados os estudos, uma proposta de melhoria no sistema elétrico é adotada e é realizado o seu projeto. Durante o desenvolvimento deste trabalho ocorre a alteração dos painéis fotovoltaicos fornecidos pela organização da competição Desafio Solar Brasil, o que ocasiona uma alteração do projeto dos conversores.

Palavras-chave: Fontes de Energia Renovável. Energia Solar. Conversores CC-CC. Barco Solar. Painéis Fotovoltaicos. Rastreamento de Máxima Potência. MPPT.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste projeto.

À equipe Barco Solar UDESC por acreditar e auxiliar no desenvolvimento da embarcação. Ao Núcleo de Processamento de Energia Elétrica da UDESC por disponibilizar seus laboratórios, componentes e fornecer os painéis fotovoltaicos para testes.

Ao orientador Dr. Yales Rômulo de Novaes por compartilhar seu conhecimento prático, auxiliando na solução das dificuldades encontradas ao longo do projeto.

Finalmente, agradeço à minha família pelo apoio e pela motivação.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 ELEMENTOS PRESENTES NO SISTEMA ELÉTRICO DA EMBARCAÇÃO	13
2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	13
2.2 CONVERSOR BOOST	16
2.3 CONVERSOR BUCK	20
2.4 ARMAZENADORES DE ENERGIA	23
2.5 MOTOR ELÉTRICO	24
2.6 SENSORES DE CORRENTE	24
2.7 FONTE AUXILIAR ISOLADA	26
3 SISTEMA ELÉTRICO DA EMBARCAÇÃO	28
3.1 SISTEMA ELÉTRICO ANTERIOR	28
3.2 ALTERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	31
3.3 ALTERAÇÃO DA PROPOSTA	32
4 PROJETO DO CONVERSOR	36
4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE PERDAS	36
4.2 PROJETO DO CONVERSOR BUCK DE ENTRADA	37
4.3 PROJETO DO FILTRO LC DE ENTRADA	40
4.4 PROJETO DO FILTRO LC DE SAÍDA	45
4.5 PROJETO DO CONVERSOR BUCK DE SAÍDA	48
4.6 CÁLCULO TÉRMICO	49
4.7 VENTILAÇÃO FORÇADA	51
5 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PLACA DE POTÊNCIA	52
6 CIRCUITOS AUXILIARES	59
6.1 OPTO-ACOPLADOR	59
6.2 DRIVER DE ACIONAMENTO DOS MOSFET	60
6.3 MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO	61
6.4 SNUBBERS	64
7 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA E ANÁLISE DE PERDAS	66

8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
8.1 CONVERSOR BUCK DE SAÍDA	69
8.2 CONVERSOR BUCK DE ENTRADA	72
9 CONCLUSÃO.....	76
10 REFERÊNCIAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de uma célula fotovoltaica.....	13
Figura 2: Corrente e tensão de um painel fotovoltaico.....	14
Figura 3: Conversor Boost.....	17
Figura 4: Primeira etapa de operação do conversor Boost	17
Figura 5: Segunda etapa de operação do conversor Boost	18
Figura 6: Formas de onda do conversor Boost em condução contínua	19
Figura 7: Conversor Buck.	20
Figura 8: Primeira etapa de operação do conversor Buck	21
Figura 9: Segunda etapa de operação do conversor Buck	21
Figura 10: Formas de onda do conversor Buck em condução contínua.....	22
Figura 11: Bateria <i>YellowTop</i> D51R	23
Figura 12: Motor elétrico.....	24
Figura 13: Sensores de corrente.....	24
Figura 14: Enrolamento no sensor de corrente.....	25
Figura 15: Filtro passa-baixa para medição.....	26
Figura 16: Fonte auxiliar.	26
Figura 17: Arranjo dos painéis fotovoltaicos.	29
Figura 18: Sistema elétrico anterior.....	29
Figura 19: Sistema elétrico instalado anterior.	30
Figura 20: Novo sistema elétrico proposto.....	34
Figura 21: Circuito elétrico do sistema proposto.....	34
Figura 22: Diodos em série com os painéis.....	35
Figura 23: Diodo MBR 6045WT.....	38
Figura 24: MOSFET IRF 3207.....	39
Figura 25: Filtro de entrada.	40
Figura 26: Capacitor do filtro de entrada.....	41
Figura 27 Circuito utilizado no dimensionamento dos capacitores.....	42
Figura 28: Parâmetros do modelo funcional de painéis fotovoltaicos simulados.	42
Figura 29: Corrente do painel fotovoltaico	43
Figura 30: Tensão no painel fotovoltaico	43
Figura 31: Tensão nos capacitores do filtro de entrada.	44
Figura 32: Potencia do painel fotovoltaico.....	44

Figura 33: Filtro de saída.....	45
Figura 34: Indutor do filtro de saída.	46
Figura 35: Corrente no indutor do filtro de saída.	47
Figura 36: Tensão no capacitor do filtro de saída.	47
Figura 37: Circuito de potência.	53
Figura 38: Face superior da placa de potência.	54
Figura 39: Face inferior da placa de potência.....	55
Figura 40: Confeção da placa.	55
Figura 41: Placa construída.	56
Figura 42: Novo sistema elétrico instalado.	57
Figura 43: Novo sistema elétrico instalado.	57
Figura 44: <i>Layout</i> do conversor.....	58
Figura 45: Opto acoplador HCPL 2200.....	59
Figura 46: Esquema de ligação do opto acoplador.....	60
Figura 47: Driver do conversor Buck de saída.	60
Figura 48: Driver do conversor Buck de entrada.	61
Figura 49: Arduino UNO.....	62
Figura 50: Display de LCD com medições.	64
Figura 51: Placa de ligação do Arduino UNO.....	64
Figura 52: Snubber dos conversores.....	65
Figura 53: Distribuição das perdas.	67
Figura 54: Estrutura utilizada para testes.	69
Figura 55: Tensão no interruptor, tensão no diodo de roda livre e corrente na carga do conversor Buck de saída.....	70
Figura 56: Tensão e corrente de carga do conversor Buck de saída.....	70
Figura 57: Tempo de subida do comando do conversor Buck de saída.	71
Figura 58: Tempo de descida do comando do conversor Buck de saída.....	71
Figura 59: Tensão e corrente da bateria.....	72
Figura 60: Tensão no interruptor e no diodo de roda livre do conversor Buck de entrada.	72
Figura 61: Tempo de subida do comando do conversor Buck de entrada.....	73
Figura 62: Tempo de descida do comando do conversor Buck de entrada.	73
Figura 63: Tensão, corrente e potência dos painéis fotovoltaicos.....	74
Figura 64: Tensão, corrente e potência dos painéis fotovoltaicos em diferentes condições de irradiação.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da razão cíclica para MPPT.....	16
Tabela 2: Equações do conversor Boost.....	19
Tabela 3: Equações do conversor Buck.....	22
Tabela 4 - Dados das baterias.....	23
Tabela 5 - Dados técnicos do motor elétrico	24
Tabela 6: Características do painel KC130TM	28
Tabela 7: Comparativo de esforços nos componentes.....	31
Tabela 8: Comparativo de perdas	31
Tabela 9: Modelos de painéis fotovoltaicos.	32
Tabela 10: Corrente eficaz nos capacitores do filtro de entrada.....	41
Tabela 11: Corrente nos capacitores do filtro de saída.....	46
Tabela 12: Dados utilizados para o projeto do dissipador de entrada.	49
Tabela 13: Dados utilizados para o projeto do dissipador de saída.....	50
Tabela 14: Distribuição das perdas.....	66
Tabela 15: Eficiência esperada com o sistema em potencia nominal.....	67
Tabela 16: Dados do painel Sunmodule SW 130 Poly.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

Ah	Ampère-hora
D	Razão cíclica (<i>Duty cycle</i>)
HP	<i>Horse power</i>
LCD	Display de cristal liquido (<i>Liquid Crystal Display</i>)
MPP	Ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
PV	Painel fotovoltaico
R _{jc}	Resistência térmica entre junção e cápsula
R _{cd}	Resistência térmica entre cápsula e dissipador
R _{da}	Resistência térmica entre dissipador e ambiente
RPM	Rotações por minuto
STC	Condições padrão de testes (<i>Standard Test Conditions</i>)

1 INTRODUÇÃO

O esgotamento das energias fósseis e os problemas de poluição ambiental têm impulsionado o desenvolvimento de fontes de energia renováveis. Esta situação tem se tornado pior na última década com os problemas de aquecimento global e catástrofes climáticas ocasionadas devido às elevadas taxas de emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

Atualmente a geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos tem se tornado atraente devido a sua simplicidade na alocação de usinas, baixo custo de manutenção, não produzir poluição sonora e ter como fonte apenas o sol, uma fonte inesgotável de energia para nosso planeta. Além dos pontos positivos citados anteriormente, o custo para se investir em energia solar vêm diminuindo consideravelmente e a eficiência dos painéis fotovoltaicos (PV) vem crescendo com o desenvolvimento de novas tecnologias, juntamente com incentivos fiscais provenientes de programas que facilitam financeiramente a instalação de usinas de fontes renováveis, reduzindo taxas de transmissão e distribuição (ANEEL,2012).

Entretanto a energia solar fotovoltaica apresenta vários pontos negativos, dentre eles pode-se citar o alto custo de implantação, que apesar das reduções, ainda é um dos principais fatores que dificultam a sua implantação em grande escala. Para isso é necessário um maior desenvolvimento tecnológico visando aumentar ainda mais a eficiência dos módulos fotovoltaicos e de todos os equipamentos necessários, juntamente com a redução dos seus custos de produção. Outro ponto crítico para a implantação de sistemas fotovoltaicos é a dificuldade de previsão do comportamento do clima, pois o projeto é afetado caso ocorram fenômenos climáticos que alterem o comportamento da irradiação solar, como por exemplo, anos mais chuvosos com maior número de dias sem sol, etc.

Sistemas de aproveitamento de energia solar fotovoltaica podem ser aplicados em sistemas embarcados de baixa e média potência, como por exemplo, em carros, barcos, aviões, satélites, comunidades isoladas, etc. Com o advento de carros solares, podem se construir estações de carga de baterias em regiões isoladas, garagens, residências, para que durante o período que o veículo não está sendo usado suas baterias sejam carregadas através da energia do sol.

Estas condições favoráveis ao uso de energia incentivam competições tecnológicas de âmbito nacional e internacional visando o desenvolvimento tecnológico, inovação e divulgação da energia solar fotovoltaica para a sociedade, além da aplicação dessas

tecnologias em carros solares, barcos solares e demais sistemas em que a energia solar tem um futuro promissor.

Um grande exemplo é o Desafio Solar Brasil, uma competição nacional que envolve várias universidades com cursos de engenharia e consiste em um rali de barcos movidos à energia solar fotovoltaica que visa o uso de tecnologias comercialmente disponíveis, onde seu principal objetivo é de maximizar a eficiência e causar pouco ou nenhum impacto ambiental, como também estimular o desenvolvimento de novas tecnologias aliadas à energia solar fotovoltaica. Esta competição é inspirada no *Frisian Solar Challenge*, competição realizada a cada dois anos na Holanda, que envolve universidades do mundo inteiro na construção de embarcações movidas única e exclusivamente à energia solar.

Este Trabalho de Conclusão de Curso envolve o estudo geral do sistema elétrico do barco solar da equipe SolarUDESC, projeto iniciado no ano de 2011 na Universidade Estadual de Santa Catarina com o objetivo de desenvolver e aplicar de forma eficiente a tecnologia da energia solar em um barco de competição, sendo realizada uma análise do sistema elétrico instalado e a proposta de uma alternativa mais eficiente e mais adequada para ser implantada no barco solar para as próximas competições.

Inicialmente foi realizado um estudo dos componentes eletrônicos da embarcação utilizados nas últimas etapas da competição e foi realizada uma proposta de aumento na tensão das baterias. O sistema antigo contava com duas baterias em série com tensão 12 V totalizando 24 V de tensão e foi estudada a possibilidade de aumentar a tensão das baterias para 48 V com o objetivo de reduzir os valores eficazes das correntes elétricas do sistema, visando um aumento da eficiência.

Durante a realização deste projeto ocorrem eventos relacionados à competição Desafio Solar Brasil que torna inviável a implementação da proposta inicial de aumento da tensão do sistema, fazendo com que seja necessária a alteração da estrutura dos conversores utilizados. Finalmente, é realizado o projeto dos conversores, sendo dimensionados os componentes e realizado uma previsão da eficiência do sistema elétrico.

2 ELEMENTOS PRESENTES NO SISTEMA ELÉTRICO DA EMBARCAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os principais elementos presentes no sistema elétrico instalado na embarcação, bem como no sistema elétrico proposto.

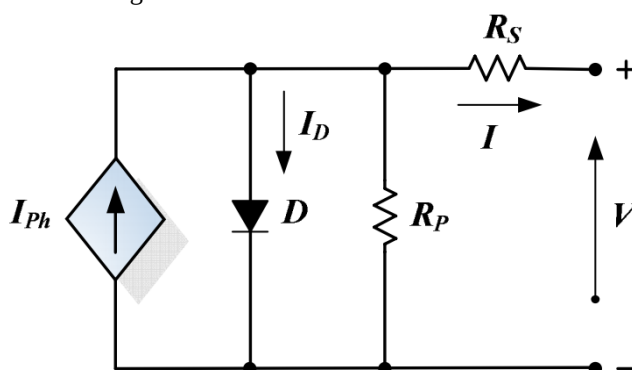
2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O princípio de funcionamento das células fotovoltaicas é o efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel. Em 1905 Albert Einstein explica a física do efeito fotoelétrico, descoberta qual Einstein recebeu o Prêmio Nobel em 1921. Apenas em 1954, começou-se a construção industrial de células fotovoltaicas, essas tinham uma eficiência de 6%, eram quase que exclusivamente utilizadas na indústria aeroespacial.

A partir destas descobertas as células fotovoltaicas vêm evoluindo com o passar dos anos e atualmente sua eficiência chega a 20% para células monocristalinas e na ordem de 40% para células multijunções em laboratório (DACOL, 2012). Porém, a eficiência das células fotovoltaicas utilizadas comercialmente é de aproximadamente 14%.

As células fotovoltaicas são constituídas de semicondutores, sendo a maioria com principal elemento químico o silício. Seu comportamento pode ser descrito pelo modelo representado na Figura 1. Painéis fotovoltaicos são constituídos, geralmente, da associação de várias células fotovoltaicas em série.

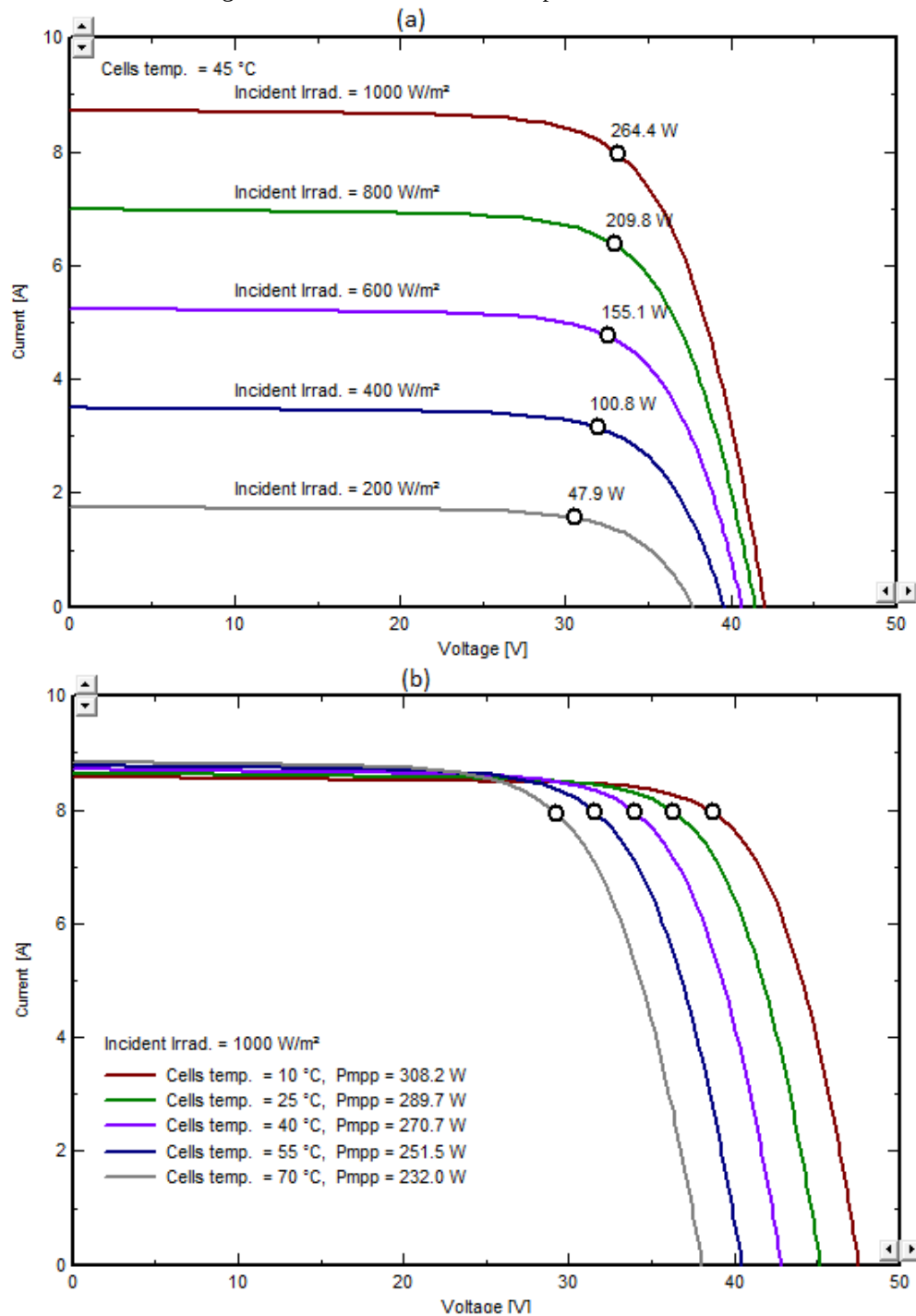
Figura 1: Modelo de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (MOLINA, PONTRORIERO e MERCADO, 2007)

Existem três fatores principais que influenciam no funcionamento de um painel fotovoltaico, que são: irradiação solar, temperatura e eficiência. A relação de tensão e corrente fornecida por um painel fotovoltaico não é linear e se altera juntamente com os fatores citados anteriormente, portanto a potência fornecida também não é constante. Na Figura 2 pode-se observar o comportamento da curva de tensão e corrente de um painel fotovoltaico, de potência 290 W nas STC, em diferentes condições de irradiação e de temperatura.

Figura 2: Corrente e tensão de um painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de KYOCERA, 2007.

Pode-se observar na Figura 2 (a) que a variação da irradiação solar tem grande influência na corrente de máxima potência do painel fotovoltaico, não afetando consideravelmente a tensão de máxima potência. A variação de temperatura tem comportamento oposto tendo grande influência na tensão de máxima potência e muito pouca influência na corrente de máxima potência como pode-se observar em Figura 2(b). Devido estes fenômenos, o painel fotovoltaico possui um ponto de máxima potência que não é fixo,

estando em constante variação conforme a variação da temperatura e da irradiação solar. Com isso, é necessário um sistema de controle responsável por manter os painéis fotovoltaicos operando nos seus respectivos pontos de máxima potência. Este controle de rastreamento do ponto de máxima potência é denominado MPPT (*Maximun Power Point Tracking*).

Existem diversos métodos de MPPT e entre estes há diferenciação entre a complexidade, eficiência e custo de implementação, portanto deve-se verificar qual método é mais adequado em cada caso. Serão apresentados alguns dos principais métodos que podem ser utilizados no sistema elétrico da embarcação.

2.1.1 Razão cíclica constante

Considera-se que a tensão de máxima potência não se altera, calcula-se a razão cíclica do conversor que mantém o painel fotovoltaico em sua tensão de máxima potência fornecida pelo fabricante. Apesar de este método ser citado por alguns autores como uma técnica de MPPT, esta forma de processar energia não é aqui considerada como método de MPPT, pois não opera com realimentação nem rastreamento. Tal método é funcional, porém não é eficiente, porque não considera as variações da tensão de máxima potência ocasionadas pela variação de temperatura e irradiação.

2.1.2 Tensão constante

Neste método é realizado o sensoriamento da tensão do painel fotovoltaico, o que possibilita um controle em malha fechada da tensão. Porém este método não é o mais eficiente, pois da mesma forma do método citado anteriormente, não considera as variações da tensão de máxima potência em função da temperatura e irradiação.

2.1.3 Método da tensão de circuito aberto e método da corrente de curto-circuito

Estes dois métodos são similares. Cada um deles prevê uma relação linear entre a corrente de curto-circuito ou tensão de circuito aberto com relação a corrente de máxima potência e a tensão de máxima potência. Conhecida esta relação é possível estimar o valor da tensão de máxima potência ou da corrente de máxima potência. O principal problema deste método, além das perdas durante os testes de curto-circuito, é a interrupção no processamento de energia para fazer estas medições, reduzindo a eficiência.

2.1.4 Perturbação e Observação

A cada instante é realizada a medição na corrente e na tensão do painel fotovoltaico, e é calculada a potência que o mesmo está fornecendo. Uma perturbação é realizada na razão

cíclica e verifica-se novamente a potência instantânea. Se a perturbação foi positiva, ou seja, aumentar a razão cíclica D , e isso resulte no aumento da potência, a próxima perturbação será novamente uma perturbação positiva da razão cíclica D , caso contrário, se a potência diminuir, a próxima perturbação será negativa, ou seja, reduzir a razão cíclica D . Desta forma a razão cíclica do conversor se estabilizará em torno do ponto de máxima potência real do painel, levando em conta todas as variações de temperatura e irradiação. Para facilitar a compreensão deste método, a Tabela 1 representa simplificada o funcionamento deste método.

Tabela 1: Variação da razão cíclica para MPPT

Perturbação da razão cíclica	Variação da potência	Próxima perturbação da razão cíclica
Incrementar D	Positiva	Incrementar D
Incrementar D	Negativa	Decrementar D
Decrementar D	Positiva	Decrementar D
Decrementar D	Negativa	Incrementar D

Fonte: Produção do próprio autor.

Segundo FEMIA (FEMIA, PETRONE, *et al.*, 2005) a perturbação da razão cíclica deve ser variável, sendo menor quando o conversor estiver próximo ao MPP do PV e deve ser maior quando está distante do MPP. Com isto, se ocorrer alguma perturbação brusca, o conversor converge rapidamente para o novo ponto de máxima potência, aumentando a eficiência do rastreamento.

Este método é muito interessante no ponto de vista de eficiência, porém apresenta custo e uma complexidade elevado devido à necessidade de sensores de tensão, corrente e microcontroladores.

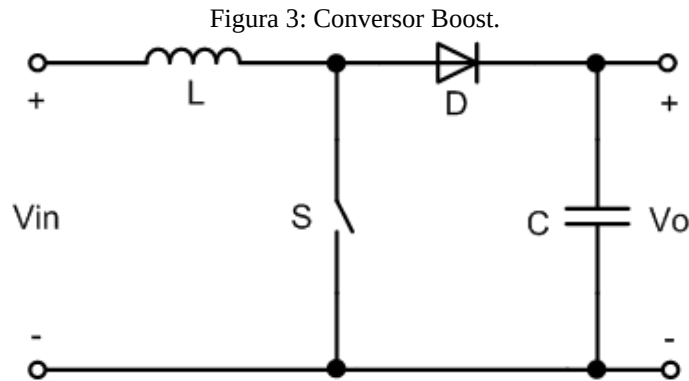
Comparando os métodos apresentados, concluiu-se que o método de perturbação e observação é o mais adequado por ser o mais eficiente. Como será realizada a construção de apenas um protótipo do conversor, o custo não é um fator muito relevante, porém para a produção em larga escala de conversores esta escolha deve ser reavaliada.

Agora é feita uma breve abordagem teórica sobre os conversores que foram utilizados neste projeto. São analisadas as etapas de operação e suas principais formas de onda, bem como as principais equações.

2.2 CONVERSOR BOOST

O conversor elevador de tensão, também conhecido como conversor Boost, é um conversor CC-CC não isolado que proporciona uma tensão de saída superior à de entrada. Para o funcionamento do conversor Boost sua entrada deve ser em corrente, para isso

obrigatoriamente deve-se inserir uma indutância L em série com a fonte de alimentação, tornando a fonte com comportamento de fonte de corrente. A carga ou saída do conversor deve se comportar como uma fonte de tensão, sendo utilizados capacitores com valores elevados ou bancos de baterias (BARBI e MARTINS, 2000). A estrutura básica do conversor Boost é apresentada na Figura 3. No modo de condução contínua, com baixa ondulação, a corrente do indutor pode ser considerada constante.

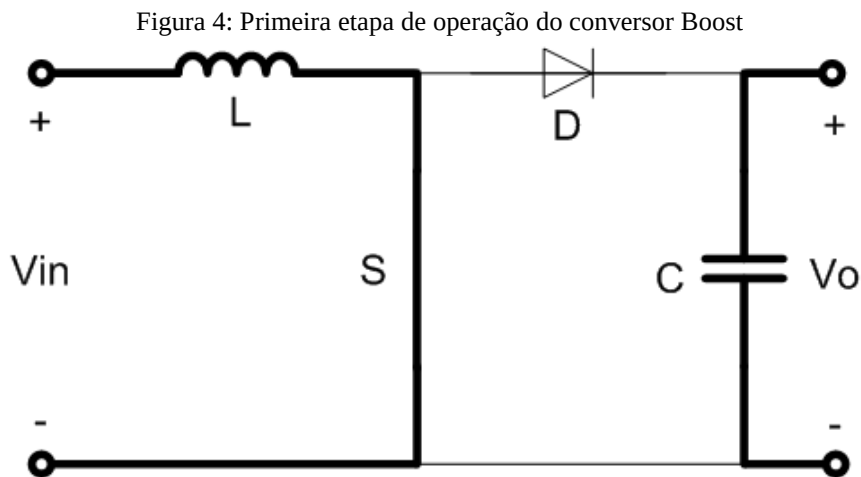


Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.1 Funcionamento do Conversor

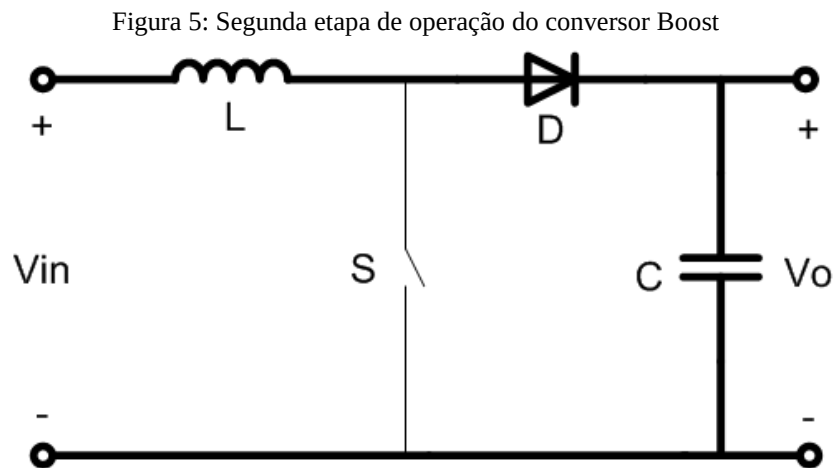
Como na entrada do conversor Boost estão conectados os painéis fotovoltaicos, deve-se garantir que o mesmo opere em condução contínua para que seja aproveitado o máximo de energia dos mesmos, pois se a condução fosse descontínua, o valor eficaz da corrente seria maior, elevando as perdas.

Em condução contínua o conversor opera em duas etapas. Na primeira etapa o interruptor encontra-se conduzindo corrente elétrica, polarizando o diodo D reversamente enquanto a fonte de entrada transfere sua energia para a indutância L conforme Figura 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

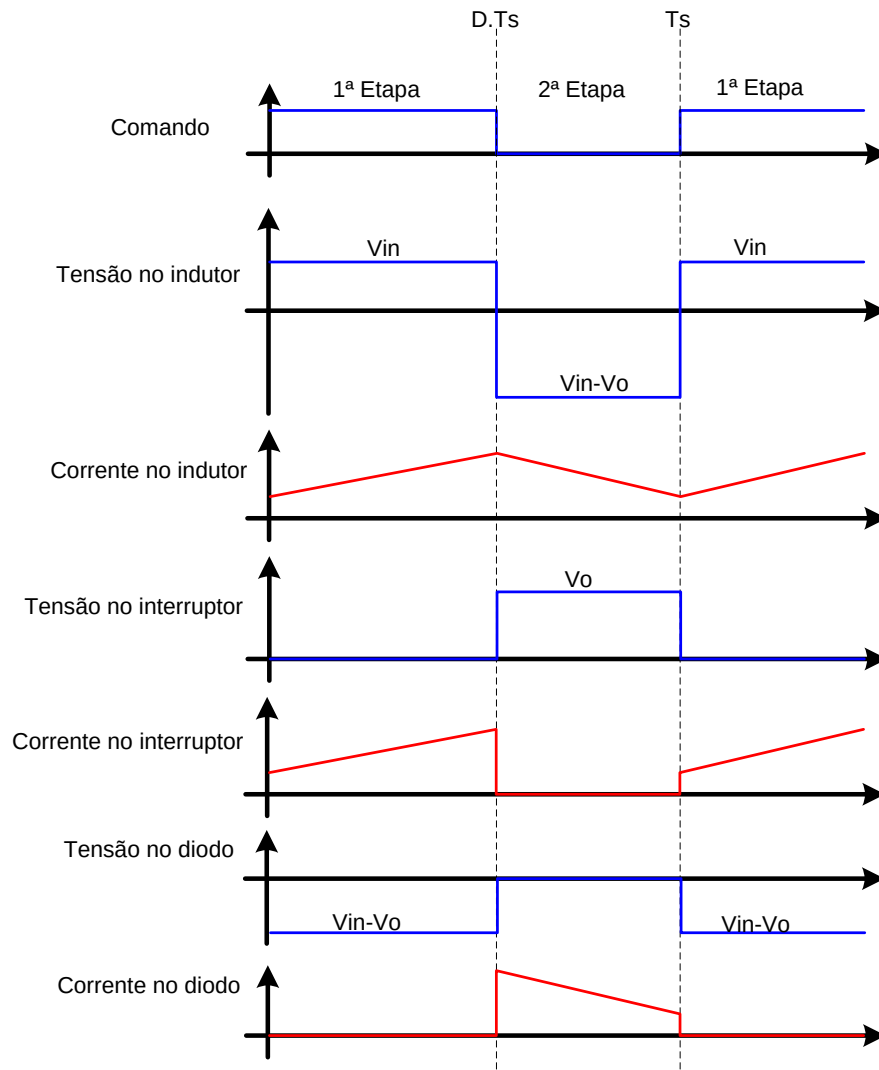
A segunda etapa ocorre quando o interruptor bloqueia a corrente elétrica, polarizando o diodo D que entra em condução e a indutância L entrega toda a energia absorvida durante a primeira etapa para a carga conforme Figura 5.



Fonte: Produção do próprio autor.

As formas de onda dos principais componentes estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Formas de onda do conversor Boost em condução contínua



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 2 estão apresentadas as equações mais importantes, sendo I_{IN} a corrente de entrada e T_S o período de comutação, que serão utilizadas posteriormente e que descrevem o funcionamento do conversor Boost.

Tabela 2: Equações do conversor Boost.

Ganho estático	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$
Corrente média no interruptor	$I_{SMED} = \frac{1}{T_S} \int_0^{D.Ts} I_{IN} dt$
Corrente eficaz no interruptor	$I_{SRMS} = \sqrt{\frac{1}{T_S} \int_0^{D.Ts} I_{IN}^2 dt}$

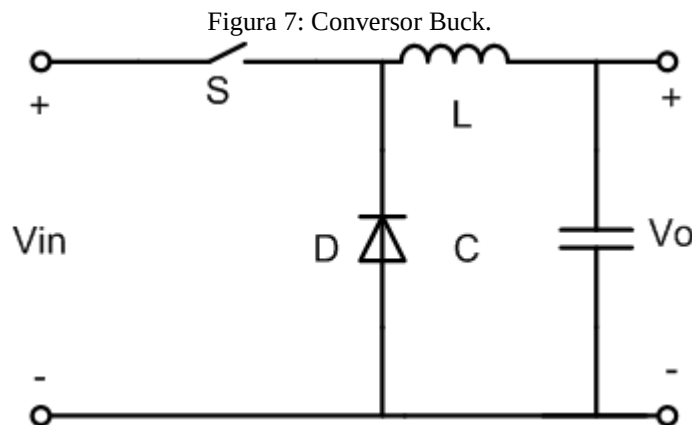
Corrente média no diodo	$I_{D\ MED} = \frac{1}{T_S} \int_0^{(1-D) \cdot T_S} I_{IN} dt$
Corrente eficaz no diodo	$I_{D\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_S} \int_0^{(1-D) \cdot T_S} I_{IN}^2 dt}$

Fonte: Produção do próprio autor.

2.3 CONVERSOR BUCK

O conversor Buck é um conversor CC-CC não isolado que produz um valor médio de tensão na saída menor ou igual ao valor médio de tensão da entrada, e a corrente média de saída é superior à de entrada devido ao princípio de conservação de energia. Este conversor é concebido de forma a possibilitar uma variação contínua da tensão média na carga desde zero até o valor da tensão de alimentação (BARBI e MARTINS, 2000).

A estrutura básica do conversor Buck já é apresentada na Figura 7.

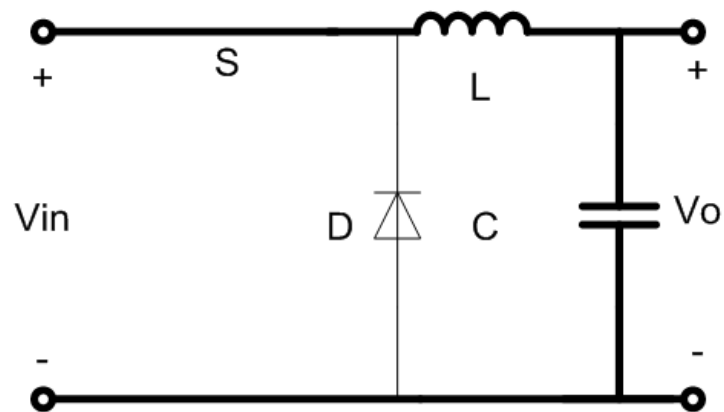


Fonte: Produção do próprio autor.

Da mesma forma que com o conversor Boost, o conversor operando no modo de condução contínua apresenta valores eficazes de corrente inferiores em comparação ao modo de condução descontínua. Por isso é desejado que este conversor opere no modo de condução contínua. Foram realizadas várias medições experimentais com o motor elétrico utilizado na embarcação e comprovou-se que não é necessária a adição de uma indutância em série com o motor para garantir que o mesmo opere em condução contínua.

Durante a primeira etapa de operação, a fonte de alimentação é conectada com a carga através do interruptor e do indutor, e como a tensão na entrada é superior à de saída, a corrente no indutor L aumenta. Pode-se verificar o circuito na primeira etapa de operação na Figura 8.

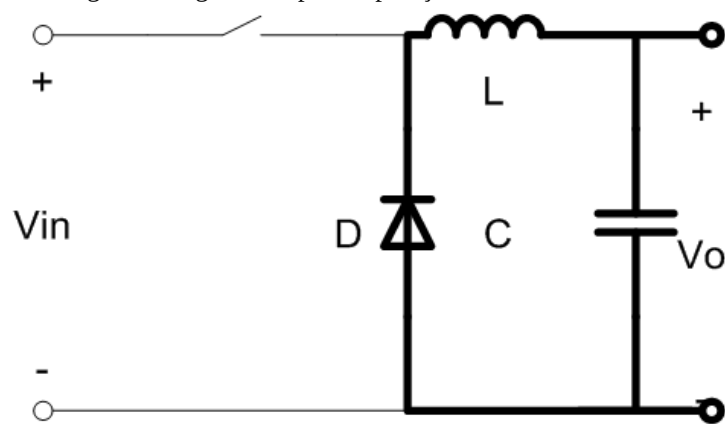
Figura 8: Primeira etapa de operação do conversor Buck



Fonte: Produção do próprio autor.

Durante a segunda etapa de operação, o interruptor é bloqueado, fazendo com que a energia armazenada no indutor mantenha a corrente circulando pela carga através do diodo de roda livre. A Figura 9 representa o conversor Buck na sua segunda etapa de operação.

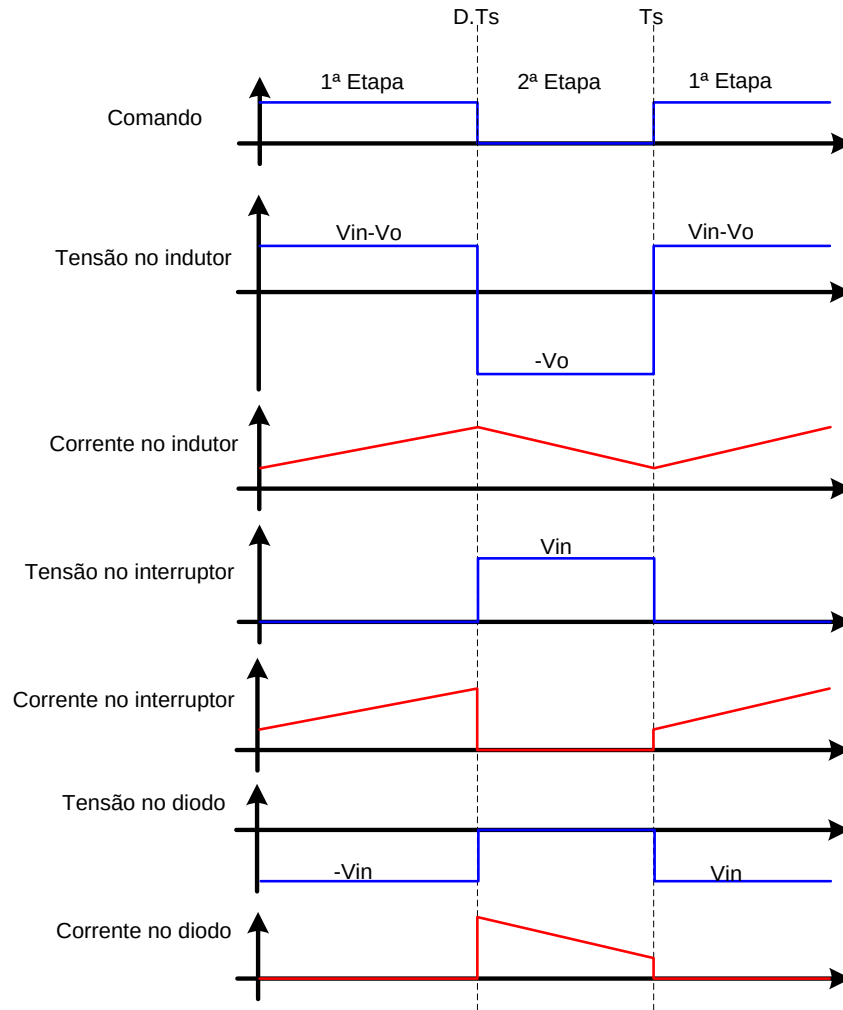
Figura 9: Segunda etapa de operação do conversor Buck



Fonte: Produção do próprio autor.

As principais formas de onda do conversor Buck estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10: Formas de onda do conversor Buck em condução contínua



Fonte: Produção do próprio autor.

As principais equações do conversor Buck no modo de condução contínua estão apresentadas na Tabela 3, considerando I_o a corrente na carga.

Tabela 3: Equações do conversor Buck

Ganho estático	$\frac{V_o}{V_i} = D$
Corrente média no interruptor	$I_{S_{MED}} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D.T_s} I_o dt$
Corrente eficaz no interruptor	$I_{S_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D.T_s} I_o^2 dt}$
Corrente média no diodo	$I_{D_{MED}} = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D).T_s} I_o dt$

Corrente eficaz no diodo	$I_{D\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{Ts} \int_0^{(1-D).Ts} I_o^2 dt}$
--------------------------	---

Fonte: Produção do próprio autor.

2.4 ARMAZENADORES DE ENERGIA

Todo sistema de energia deve possuir alguma forma de armazenamento de energia, pois caso a carga não utilize toda a energia fornecida, esta energia é armazenada para ser utilizada posteriormente. Como trata-se de um sistema fotovoltaico, apenas há geração de energia enquanto houver sol, portanto deve haver sistemas como baterias ou bancos de capacitores que armazenam energia excedente para fornecê-la em momentos que a fonte principal de energia não está disponível ou que a demanda seja maior que a produção.

O barco solar da equipe SolarUDESC conta atualmente com duas baterias *Optima YellowTop* modelo D51R do fabricante *Optima Batteries*. Os dados mais importantes da bateria estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados das baterias.	
Modelo	D51 / D51R
Tensão nominal	12 V
Capacidade	41 Ah
Peso	11,8 kg
Resistência interna	0,0046 Ω

Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se verificar uma foto da bateria na Figura 11:

Figura 11: Bateria *YellowTop* D51R



Fonte: Produção do próprio autor.

2.5 MOTOR ELÉTRICO

O motor utilizado na embarcação é um motor elétrico de corrente contínua de alta eficiência, com escovas e de imã permanente. O modelo do motor é ME0909, do fabricante *Electric Motorsport*, que é fabricado para se utilizar em sistemas à baterias. As principais características e especificações do motor elétrico são representadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados técnicos do motor elétrico	
Modelo	ME0909
Potência nominal	4 HP
Tensão	12-48 V
Velocidade de rotação	2150-4850 RPM

Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se visualizar o motor elétrico na Figura 12.

Figura 12: Motor elétrico.



Fonte: (ELECTRICMOTORSPORT, 2012)

2.6 SENSORES DE CORRENTE

Os sensores de corrente utilizados para realizar as medidas no conversor são de efeito HALL *Honeywell* CSNT651 conforme Figura 13. Por serem sensores isolados, facilitam a medição e evitam perdas na medição, como por exemplo, com a utilização de resistores shunt, que além de não isolados tem como princípio de funcionamento a queda de tensão sobre uma resistência baixa, consequentemente produzindo perdas adicionais ao sistema.

Figura 13: Sensores de corrente.

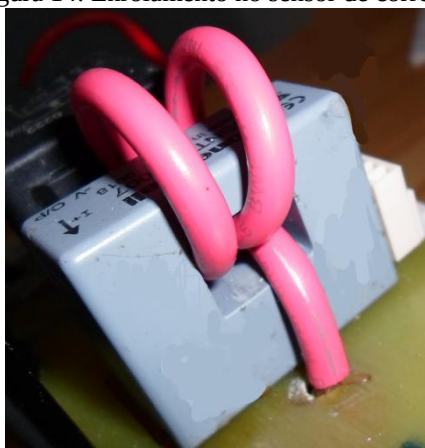


Fonte: Produção do próprio autor.

Os sensores de efeito hall possuem uma precisão elevada trazendo confiabilidade nas medições, porém necessitam de alimentação simétrica. A corrente de saída do sensor possui um ganho 0,0005, ou seja, a corrente fornecida pelo pino de saída do sensor é 2.000 vezes menor que a corrente total que o atravessa. Vale ressaltar que o sensor é bidirecional, ou seja, caso a corrente que o atravessa for negativa, sua saída será em corrente negativa também.

Para utilizar o sensor na sua região de boa resolução, é possível passar várias vezes o condutor por dentro do sensor, conforme na Figura 14.

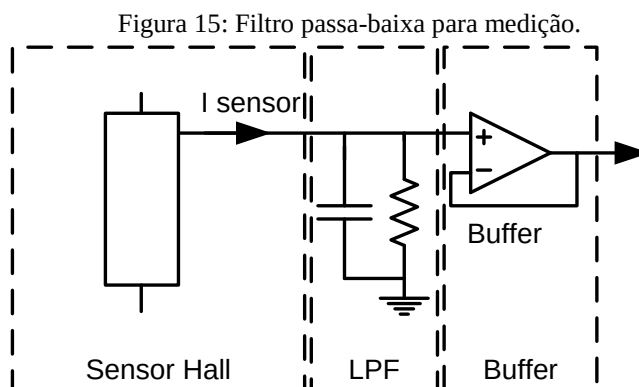
Figura 14: Enrolamento no sensor de corrente.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com isso a corrente medida é igual à corrente que passa pelo ponto do circuito, porém multiplicada pelo número de voltas que atravessam o sensor.

Para converter o sinal em corrente gerado pelo sensor em uma tensão para ser lida pelo conversor AD do microcontrolador utiliza-se um resistor em série com o mesmo, conforme ilustrado na Figura 15. Porém, como algumas correntes medidas não são contínuas, apresentando formato retangular, e deseja-se obter apenas seus valores médios, é utilizado um filtro passa-baixas na saída do sensor com o objetivo de filtrar as componentes de alta frequência e apenas medir o valor médio da corrente. Além disso, é utilizado um buffer para garantir o acoplamento e evitar que a corrente drenada pelo conversor AD possa influenciar na medição. A frequência de corte do filtro foi calculada para 1.000 Hz, para que o filtro não influencie na dinâmica das medições.



Fonte: Produção do próprio autor.

Este ganho do sensor é compensado após a medição pelo conversor AD do microcontrolador, que multiplica o valor medido pelo ganho do sensor. Para este ganho se tornar mais exato foi realizada uma calibração experimental, ou seja, foi inserida uma corrente conhecida no sensor e foi verificado qual o valor digital que o conversor AD estava retornando. Com isso foi possível realizar uma calibração muito precisa do ganho do sensor, sendo possível eliminar erros não desejados, como a tolerância do resistor utilizado.

2.7 FONTE AUXILIAR ISOLADA

A fonte auxiliar que está apresentada na Figura 16 é utilizada para alimentar os circuitos de controle e comando do conversor. A alimentação simétrica utilizada pelos sensores de corrente também são obtidas a partir desta fonte, visto que a mesma possui duas saídas 12 V isoladas.

A fonte opera normalmente com tensões entre 19 V e 35 V na sua entrada, isto é muito válido para o sistema elétrico, pois qualquer oscilação do nível de tensão das baterias é abrangida por essa faixa de operação.

Figura 16: Fonte auxiliar.



Fonte: Produção do próprio autor.

São utilizadas duas fontes deste modelo, sendo que uma fonte é utilizada somente para a obtenção da alimentação isolada do comando dos interruptores do conversor Buck de entrada que será explicado posteriormente.

3 SISTEMA ELÉTRICO DA EMBARCAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as características da instalação elétrica que já foi utilizada em competições anteriores, bem como a proposta de alteração do sistema elétrico.

3.1 SISTEMA ELÉTRICO ANTERIOR

Nesta seção é apresentado o circuito elétrico já instalado na embarcação utilizado nas competições anteriores.

3.1.1 Painéis fotovoltaicos fornecidos

A organização da competição Desafio Solar Brasil, com o objetivo de promover uma maior competitividade entre os participantes, fornece para todas as equipes painéis solares que devem ser utilizados na embarcação, não sendo permitido substituí-los por outros modelos que podem ser de maior potência ou mais eficientes. Todos são do mesmo fabricante e do mesmo modelo, portanto possuem características similares. O módulo fotovoltaico fornecido e utilizado nas últimas competições é o KC130TM do fabricante Kyocera e suas principais características estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Características do painel KC130TM

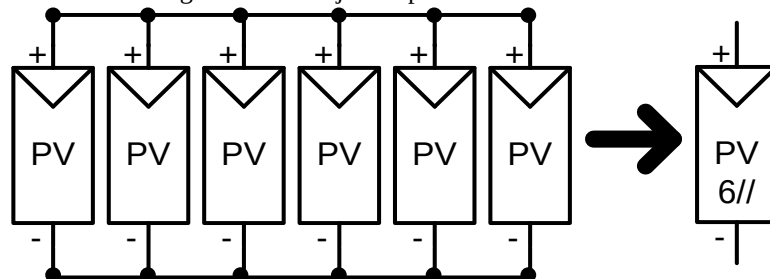
Desempenho Elétrico na Condição Padrão de Testes (STC)	
Potência Máxima (P _{max})	130 W (+ 10% / - 5%)
Tensão de Máxima Potência (V _{mpp})	17,6 V
Corrente de Máxima Potência (I _{mpp})	7,39 A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	21,9 V
Corrente de Curto Circuito (I _{sc})	8,02 A
Coeficiente de Temperatura de V _{oc}	-82,1 mV/°C
Coeficiente de Temperatura de I _{sc}	3,18 mA/°C
Número de Células por Módulo	36

Fonte: Produção do próprio autor.

A STC mencionada na Tabela 6 se refere às condições padrão de testes, que são: irradiação solar de 1.000 W/m² e temperatura do painel de 25 °C.

O arranjo dos painéis da embarcação da equipe Solar UDESC consiste em seis painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, conforme está representado na Figura 17.

Figura 17: Arranjo dos painéis fotovoltaicos.

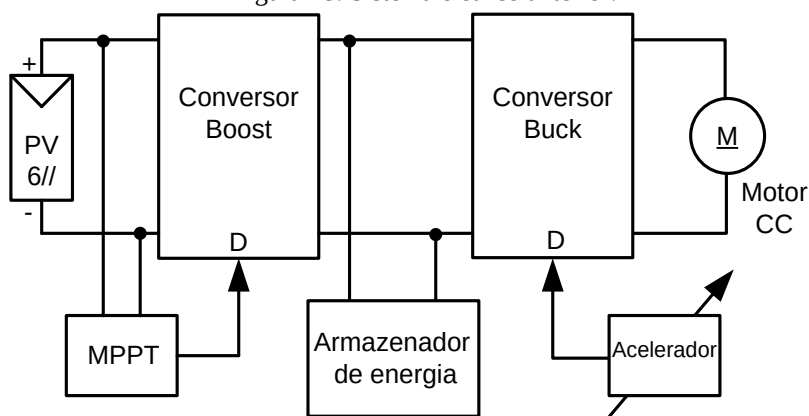


Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.2 Conversores de energia

O sistema elétrico simplificado que está instalado na embarcação atualmente está representado na Figura 18.

Figura 18: Sistema elétrico anterior.



Fonte: Produção do próprio autor.

O conversor Boost é onde o MPPT dos painéis fotovoltaicos é realizado através do controle de sua razão cíclica. Um microcontrolador PIC foi utilizado nas competições anteriores e atualmente está sendo usado um microcontrolador Arduino UNO para realizar o algoritmo de MPPT do tipo perturba e observa visando manter os painéis fotovoltaicos na região de máxima potência.

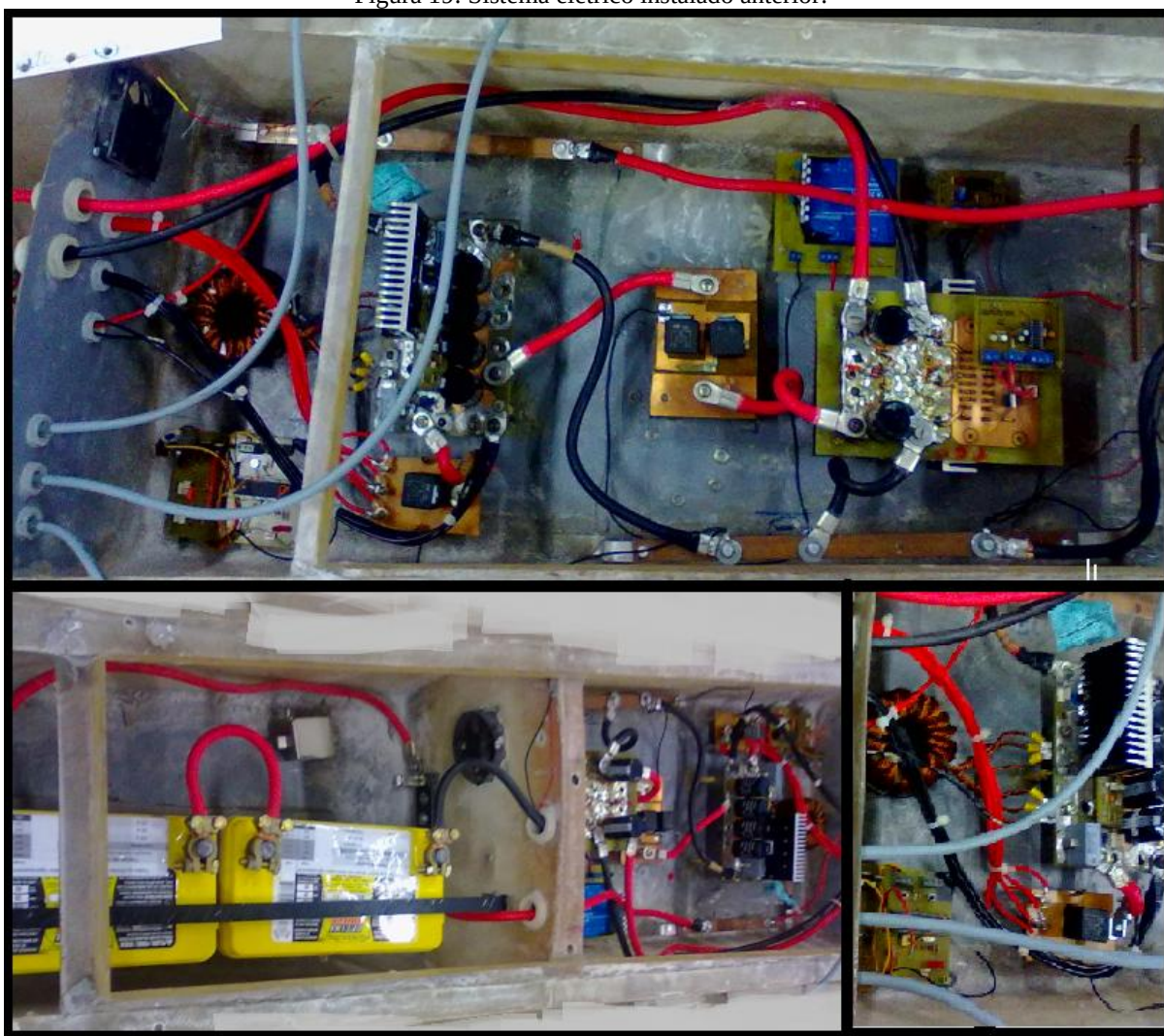
O conversor Buck é responsável por realizar o controle de tensão média fornecida para o motor elétrico, e consequentemente a potência entregue ao mesmo, possibilitando ao piloto ajustar a velocidade do barco através de um potenciômetro disponível no painel, que varia a razão cíclica do conversor. Tal controle é em malha aberta, ou seja, o piloto tem total autonomia na escolha da razão cíclica, analogamente a um “acelerador” para o motor do barco.

O sistema utilizado na ultima competição possui duas baterias de 12 V associadas em série, totalizando 24 V, que armazenam a energia excedente para que quando ocorram

situações de baixa irradiação, ou até mesmo durante a noite, seja possível utilizar a embarcação.

Cada conversor possuía uma placa de potência própria e suas respectivas placas auxiliares de comando e alimentação. A separação dos conversores em placas diferentes facilitava caso fosse necessária a manutenção em apenas um deles, porém a instalação na embarcação se torna muito trabalhosa, facilitando a ocorrência de acidentes e possivelmente danificando as placas. Na Figura 19 pode-se observar uma figura do sistema elétrico antigo instalado na embarcação.

Figura 19: Sistema elétrico instalado anterior.



Fonte: Produção do próprio autor.

O sistema apresenta várias placas e cabos de interligação, tornando o circuito confuso aumentando a dificuldade no entendimento em caso de necessidade de manutenção ou durante a sua montagem.

3.2 ALTERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

No presente capítulo é realizada uma comparação do sistema elétrico utilizado nas ultimas competições com uma proposta que tem o objetivo de aumentar, principalmente a sua eficiência. A proposta inicial foi de elevar a tensão do banco de baterias para 48 V com o objetivo de reduzir os valores eficazes das correntes elétricas visando uma redução nas perdas de condução. Após realizada a análise, ocorreram alguns fatores externos relacionados à competição Desafio Solar Brasil, fazendo com que esta proposta não fosse realizada e abrindo a necessidade de alterar a estrutura dos conversores.

3.2.1 Comparações do sistema antigo 24 V com o sistema 48 V

Conforme já citado anteriormente, foi proposto um aumento de tensão do sistema para 48 V com o objetivo de reduzir o valor das correntes do sistema elétrico, e consequentemente reduzir as perdas. Pode-se verificar uma comparação dos esforços nos componentes para os sistemas em 24 V e 48 V na Tabela 7.

Tabela 7: Comparativo de esforços nos componentes

Esforços	Sistema 24V	Sistema 48V
Corrente média no MOSFET Boost [A]	14,37	7,16
Corrente eficaz no MOSFET Boost [A]	25,28	12,61
Corrente no momento de bloqueio [A]	43,13	23,64
Tensão no momento de bloqueio [V]	26,31	51,16
Corrente média no Diodo Boost [A]	30,05	15,01
Corrente eficaz no Diodo Boost [A]	36,52	18,25
Corrente eficaz Bateria [A]	25,72	21,91
Corrente média no MOSFET Buck [A]	41,84	21,11
Corrente eficaz no MOSFET BUCK [A]	50,01	35,69
Corrente média no Diodo Buck [A]	17,93	39,20
Corrente eficaz no Indutor Boost [A]	43,11	22,18

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir dos esforços de tensão e corrente nos principais componentes, foi realizada uma análise comparativa nas perdas dos dois sistemas foi realizada e está apresentada na Tabela 8. Pode-se verificar que os esforços de corrente nos componentes foram reduzidos, porém os esforços de tensão aumentaram.

Tabela 8: Comparativo de perdas

Perdas	Sistema 24V	Sistema 48V
Diodo Buck	7,2	4,95
Diodo Boost	11,71	15,6
MOSFET Buck	6,71	4,32

MOSFET Boost	5,72	4,7
Resistência das Baterias	6,09	8,83
Capacitores	13,32	9,96
Magnéticas Indutor	7,28	7,28
Condução Indutor	3,43	0,92
Total	61,46	56,56

Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se observar que o aumento da tensão para 48 V reduz as perdas do sistema, porém esta redução de perdas não é muito significativa. As perdas de condução foram reduzidas, porém as perdas no conversor Buck de saída não sofrem alterações significativas, pois a corrente necessária no motor se mantém praticamente constante.

Para implantar esta alteração no sistema, é necessário adquirir novas baterias e descartar as baterias que já são utilizadas. Isso ocorre devido uma regulamentação da quantidade máxima de energia que pode ser armazenada nas baterias do barco é de 1.000 W.h, e as baterias utilizadas já estão muito próximas deste limite. Portanto é necessário adquirir novas baterias, totalizando 48 V de tensão e não ultrapassando o limite máximo de armazenamento.

3.3 ALTERAÇÃO DA PROPOSTA

No decorrer do desenvolvimento desse projeto, alguns fatores ocorreram e tornou inviável a implantação da proposta de aumento de tensão do sistema. Dentre os ocorridos pode-se citar os principais. O primeiro foi o fato da organização da competição Desafio Solar Brasil, que ao final do primeiro semestre de 2012, solicitou a devolução das placas fotovoltaicas que estavam em posse das equipes participantes. Após este evento não foram informadas as placas fotovoltaicas que seriam fornecidas para a próxima etapa da competição. Havia duas hipóteses iniciais de modelos de painéis fotovoltaicos que seriam fornecidos, os quais estão apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Modelos de painéis fotovoltaicos.

Modelo	Potência	Vmp	Imp	Voc	Icc
KD240GX-LPB	240	29,8	8,06	36,9	8,59
Sun Power	240	40,5	5,93	48,6	6,3

Fonte: Produção do próprio autor.

Porém com o passar dos meses esta decisão se tornou cada vez mais incerta, tendo a possibilidade de não ser nenhuma das duas opções mencionadas. O segundo foi a necessidade de adquirir novas baterias, conforme citado previamente para elevar o sistema para 48 V, e a

equipe não contava com recursos financeiros para adquiri-las. Além disso, as baterias que já eram utilizadas e que estão em bom estado não teriam mais utilidade nenhuma.

Com isso, foi optado modificar a estrutura dos conversores utilizados, sendo que o MPPT não seria mais realizado por um conversor Boost, e sim por outro tipo de conversor e manter a tensão do sistema em 24 V.

Foi levantada a possibilidade de se utilizar um conversor Buck-Boost que é capaz de elevar ou reduzir a tensão, pois assim seria possível realizar o MPPT para qualquer tipo de painel fotovoltaico. Porém, após uma análise geral concluiu-se que a corrente total que circula pelo indutor teria um valor extremamente elevado, em torno de 70 A, o que ocasionaria a necessidade de construção de um indutor muito volumoso e pesado devido à quantidade de cobre necessária. Com isso foi tomada a decisão que o conversor utilizado neste projeto é do tipo Buck.

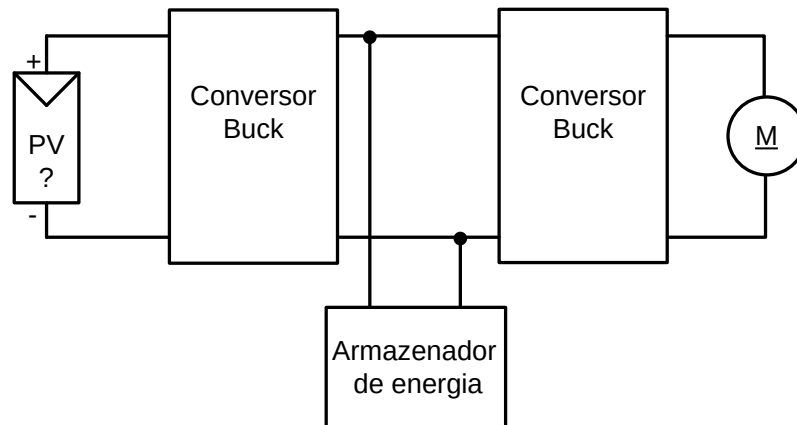
Com o conversor Buck o sistema se torna independente do painel fotovoltaico fornecido pela organização. O MPPT pode se tornar viável apenas alterando a configuração dos painéis em série-paralelo ajustando a tensão de máxima potência. Se o conversor Boost fosse mantido e o modelo de painel fornecido possuísse tensão superior ou muito próxima à tensão das baterias, não seria possível realizar o MPPT adequadamente ou até mesmo seria inviável. Com o conversor Buck realizando o MPPT este problema não ocorreria, pois se a tensão de máxima potência do painel for superior à tensão das baterias somente utiliza-se um painel em série em cada arranjo de painéis. Caso a tensão do painel for inferior, se associam dois painéis em série por arranjo de painéis dobrando a tensão de máxima potência e superando novamente a tensão das baterias.

Por estes motivos foi realizado um novo projeto do conversor para realizar o MPPT, tendo como maior característica a versatilidade necessária para a incerteza do painel fotovoltaico mantendo a tensão do sistema em 24 V.

Esta escolha, porém tem seus pontos negativos. A associação de painéis fotovoltaicos em série eleva a tensão de máxima potência, porém, em caso de sombreamento de um painel fotovoltaico, todos os painéis que estão associados em série com o painel sombreado tem seu funcionamento comprometido ou até mesmo fica inutilizado.

O novo sistema proposto tem uma configuração muito semelhante, apenas alterando o tipo do conversor que realiza o MPPT. Pode-se verificar a nova estrutura do sistema elétrico na Figura 20.

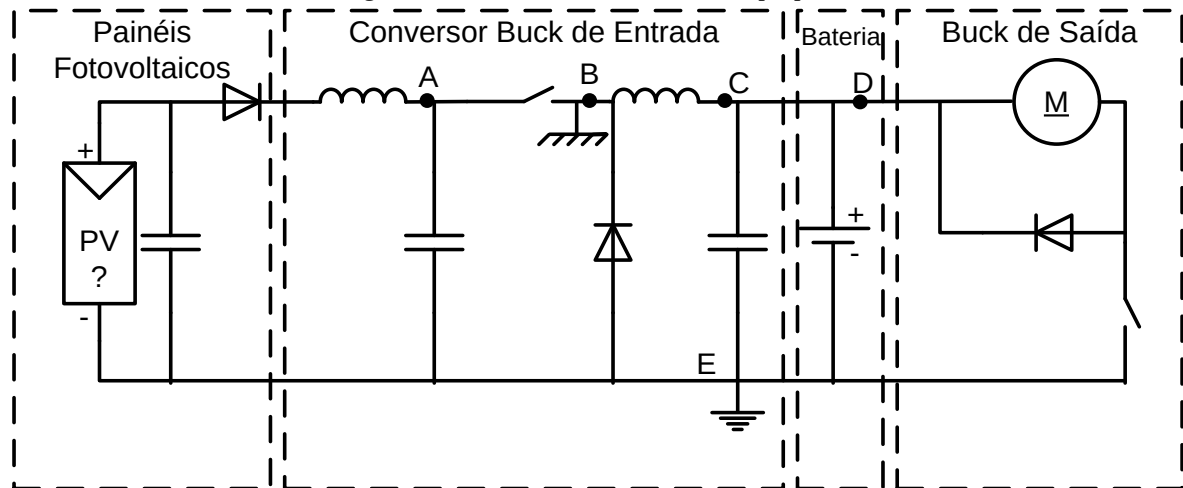
Figura 20: Novo sistema elétrico proposto.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os principais elementos e a estrutura básica dos conversores estão apresentados na Figura 21.

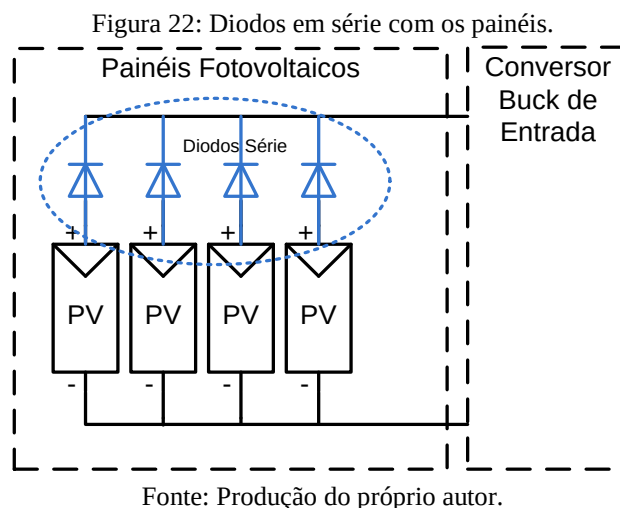
Figura 21: Circuito elétrico do sistema proposto.



Fonte: Produção do próprio autor.

No ponto A do conversor Buck de entrada é realizada a medição de corrente e tensão dos painéis fotovoltaicos para a realização do MPPT. No ponto C também são realizadas medições da corrente no indutor e da tensão da bateria, abrindo a possibilidade de se realizar MPPT na saída do conversor e não na entrada dos painéis como o usual. O ponto D consiste em um sensor da corrente que está sendo fornecida ao motor.

A utilização de diodos em série com os painéis é necessária para que não haja retorno de corrente das baterias para os painéis durante a noite ou quando a irradiação é fraca. Esta circulação de corrente além de gerar perdas pode danificar os painéis. Este elemento pode ser observado na Figura 22.



Os diodos especificados para esta função são diodos que não necessitam apresentar uma elevada tensão reversa máxima, pois a tensão aplicada sobre eles é a diferença entre a tensão das baterias e a tensão do painel, portanto a tensão é baixa. Porém, estes diodos estão submetidos à corrente nominal do painel. É necessária a adição destes diodos em série em cada painel fotovoltaico, evitando assim a circulação de corrente entre os painéis caso apenas um deles esteja sombreado, por exemplo. Estes diodos também tem a função de prevenir que ocorra retorno da corrente das baterias durante a noite ou em momentos de baixa irradiação.

Um aspecto muito importante desta nova estrutura é que há necessidade de possuir um comando isolado dos interruptores. Como pode-se observar no ponto B do circuito, a fonte do MOSFET não está referenciada ao terra, ao contrário do que ocorria anteriormente com o conversor Boost. Este é um ponto negativo para esta estrutura, pois foi necessária a inserção de mais componentes, aumentando a chance de falhas e aumentando o peso. Para solucionar este problema foi utilizada uma fonte auxiliar isolada adicional, e o acoplamento da referência geral do sistema para a referência isolada foi feito através de um opto-acoplador. A estrutura deste comando isolado está apresentada mais adiante no relatório.

Outro item muito importante levado em conta no projeto foi a facilidade de instalação ou manutenção dos elementos.

4 PROJETO DO CONVERSOR

Neste capítulo será demonstrado o projeto dos conversores de entrada e de saída. Serão apresentados os esforços nos componentes e em seguida o componente escolhido com suas principais especificações. O cálculo de perdas para cada componente não será demonstrado, porém a metodologia utilizada está apresentada a seguir.

4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE PERDAS

O cálculo de perdas é diferente em cada tipo de componente. Abaixo estão apresentadas as metodologias de cálculo de perdas em cada componente presente no sistema elétrico.

4.1.1 MOSFET

Para o cálculo das perdas nos interruptores são utilizados os valores de corrente eficaz, resistência dreno-fonte, tensão e corrente de comutação e frequência de comutação.

O cálculo das perdas de condução foi realizado conforme 3.1.

$$P_{CONDUÇÃO} = R_{DS} \cdot I_{EF}^2 \quad (3.1)$$

Onde:

$R_{DS} \rightarrow$ resistência dreno – source @ 100°C

$I_{EF} \rightarrow$ valor eficaz da corrente

Para o cálculo das perdas de comutação do MOSFET não é considerado o tempo de recuperação reversa dos diodos, pois os diodos utilizados neste projeto são da tecnologia Schottky e não possuem recuperação reversa. Para o cálculo utiliza-se 3.2:

$$P_{COMUTAÇÃO} = \frac{1}{2} \cdot (t_R + t_F) \cdot f_S \cdot I_{COM} \cdot V_{COM} \quad (3.2)$$

Onde:

$t_R \rightarrow$ Tempo de subida da corrente

$t_F \rightarrow$ tempo de descida da corrente

$f_S \rightarrow$ frequência de comutação

$I_{COM} \rightarrow$ corrente no momento da comutação

$V_{COM} \rightarrow$ tensão no momento da comutação

4.1.2 Diodo

Para o cálculo das perdas de condução no diodo, são necessários os dados de queda de tensão sobre o diodo e corrente média. A equação 3.3 é utilizada para o cálculo de perdas.

$$P_{CONDUÇÃO} = I_{MED} \cdot V_F \quad (3.3)$$

Onde:

$I_{MED} \rightarrow$ corrente média

$V_F \rightarrow$ queda de tensão no diodo

Como o conversor possui apenas diodos Schottky, não são consideradas as perdas de comutação, pois o tempo de recuperação reversa é desprezível, e não é fornecido seu valor pelo fabricante.

4.1.3 Indutor

O indutor apresenta perdas de condução no cobre que podem ser calculadas da mesma forma que para o MOSFET utilizando a resistência equivalente do enrolamento.

Além das perdas de condução o indutor apresenta perdas magnéticas que são calculadas a partir de dados do material magnético do núcleo. A perda total é proporcional ao volume de material magnético.

4.2 PROJETO DO CONVERSOR BUCK DE ENTRADA

O Buck de entrada é responsável por processar a energia fornecida pelos painéis. Em outras palavras ele realiza o MPPT dos painéis e também realiza o controle de carga da bateria. O mesmo foi projetado para um painel com tensão de máxima potência em torno de 30 V, tensão mínima para o bom funcionamento do controle, e, consequentemente, os esforços de corrente maiores.

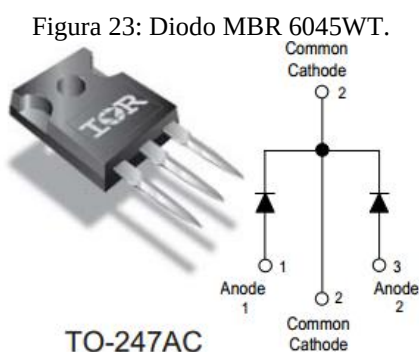
A frequência de comutação deste conversor é de 30 kHz, sendo que a razão cíclica é controlada pelo microcontrolador que realiza o MPPT.

4.2.1 Diodo de roda livre:

Como já mencionado anteriormente, o diodo de roda livre é responsável por conduzir a corrente do indutor de saída do conversor Buck enquanto o interruptor permanece aberto. Os esforços de corrente e tensão aplicados sobre o componente estão apresentados a seguir:

- Corrente média: 4,2 A
- Corrente eficaz: 11,5 A
- Tensão reversa máxima: 37 V

A partir dos esforços relacionados acima foi escolhido o diodo Schottky MBR6045. Este modelo apresenta dois diodos por encapsulamento, conforme Figura 23. A escolha de um diodo com capacidade de corrente elevada é válida se for levado em conta a eficiência final do conversor. Com um diodo para uma corrente mais elevada, as perdas de condução são inferiores e, além disso, caso seja desejado aumentar a potência dos painéis de entrada, pode-se utilizar o mesmo diodo. Outro fator para a decisão foi a utilização dos mesmos componentes no conversor de entrada e no conversor de saída, reduzindo a variedade de componentes presentes na instalação.



Fonte: Adaptado de (IRF, 2006)

Os pinos 1 e 3 são interligados, assim cada encapsulamento consiste em dois diodos em paralelo. Suas principais características estão apresentadas a seguir:

- Corrente máxima para cada diodo: 30 A
- Tensão máxima reversa: 45 V
- Queda de tensão com corrente nominal: 0,5 V

A perda total no componente é calculada a partir dos esforços de corrente e sua queda de tensão. As perdas de comutação são desprezíveis, pois se trata de um diodo Schottky. A perda final calculada no diodo foi de 2,06 W.

4.2.2 Interruptor

O interruptor do conversor Buck é responsável pelo controle do fluxo de potência do conversor através da variação de sua razão cíclica. Quando o mesmo está em condução, a energia da fonte de entrada é transferida para a saída.

Os esforços de corrente e tensão aplicados ao componente estão apresentados abaixo.

- Corrente média: 28,2 A
- Corrente eficaz: 30,2 A
- Tensão reversa máxima: 37 V

O MOSFET escolhido é o IRF3207 e está apresentado na Figura 24.

Figura 24: MOSFET IRF 3207.



Fonte: (IRF, 2006)

Suas características principais estão apresentadas a seguir:

- Corrente máxima: 130 A
- Resistência dreno-fonte: 3,6 m Ω @100°C
- Tensão reversa máxima: 75 V

Um aspecto importante de se ressaltar é que o valor da resistência dreno-fonte fornecida pelo catálogo do fabricante deve ser compensada para a temperatura de projeto, assim a resistência série na temperatura foi de 5,8 m Ω .

Foi determinada a utilização de dois interruptores em paralelo, dividindo a corrente entre eles e consequentemente reduzindo as perdas.

As perdas calculadas são divididas entre perdas de condução e perdas de comutação. As perdas de condução em cada MOSFET foram de 1,3 W e as perdas de comutação 1,4 W totalizando 2,7 W de perdas em cada MOSFET. Como são utilizados dois em paralelo, as perdas totais nos MOSFET de entrada são 5,4 W. Não foi considerado o desequilíbrio de corrente para o cálculo de perdas de condução, pois como o MOSFET utilizado apresenta coeficiente positivo de resistência, com o equilíbrio térmico dos conversores pode-se considerar que haverá uma distribuição natural da corrente entre eles.

4.2.3 Diodos série com os painéis.

A corrente nominal dos painéis para a menor tensão de entrada é de 8,6 A. Por ser uma corrente elevada, foram utilizados dois diodos em paralelo para cada painel, totalizando 8.

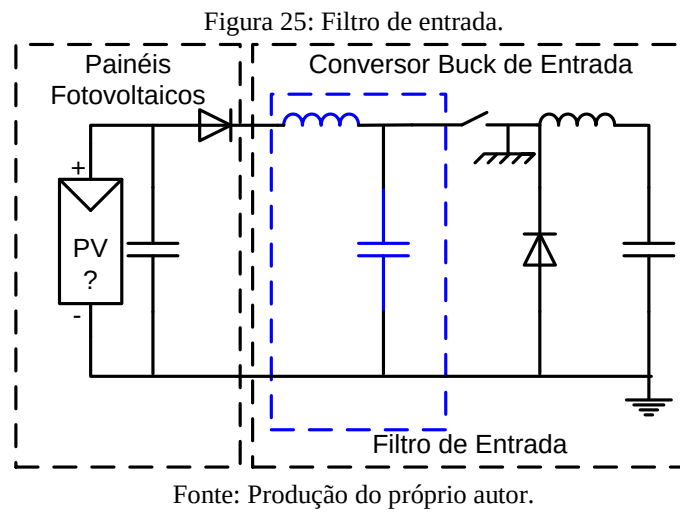
O modelo escolhido foi o SB3040, que tem como características: corrente máxima de 30 A e tensão reversa máxima de 40 V. A queda de tensão nos mesmos é de 0,37 V caso seja utilizado apenas um, porém utilizando dois em paralelo a queda de tensão cai para 0,34 V.

As perdas no diodo calculadas são de 1,46 W para cada diodo, totalizando 11,68 W de perdas. Pode-se observar nesta escolha que as perdas nos diodos em série com os painéis são

elevadas, portanto este é um ponto negativo de se utilizar um conversor Buck, pois com a utilização de um conversor Boost estes diodos não eram necessários.

4.3 PROJETO DO FILTRO LC DE ENTRADA

Para ser possível realizar o MPPT dos painéis fotovoltaicos através de um conversor Buck, é necessária a utilização de um filtro na entrada conforme representado na Figura 25. Isso se deve pelo fato que o conversor Buck possui característica de fonte de tensão na entrada e os painéis apresentam característica de fonte de corrente.



Para o projeto do filtro foi considerada a pior situação na qual a tensão na entrada do conversor fosse maior, pois a ondulação de corrente é maior nesta situação. Foi considerado que a tensão de máxima potência dos painéis fosse, no máximo, 42 V (baseado no painel fotovoltaico do SunPower 240) e a corrente máxima de entrada fosse igual à ligação de 4 painéis deste mesmo modelo em paralelo.

A ondulação máxima admitida na corrente de entrada foi de 10%, e a ondulação máxima de tensão admitida de 5%. O cálculo do capacitor e do indutor de filtro de entrada está apresentado em 3.4 e 3.5 (BARBI e MARTINS, 2000).

$$C_{in} = \frac{I}{4 \cdot f \cdot \Delta V} = 207 \mu F \quad (3.4)$$

$$L_{in} = \frac{1}{31} \cdot \frac{I_o}{f^2 \cdot C_{in} \cdot \Delta I} = 3,97 \mu H \quad (3.5)$$

Porém o valor da capacitância calculado não pode ser utilizado se for levado em conta a resistência série (RSE) e a corrente eficaz máxima de cada capacitor. Com isso foram realizadas simulações considerando a resistência série de cada capacitor, e adicionando

capacitores em paralelo até que a corrente eficaz em cada um fosse inferior ao limite máximo. Para isso foi escolhido um modelo de capacitor eletrolítico de $820\mu\text{F}$ apresentado na Figura 26, disponível no laboratório. Através dos dados de seu catálogo concluiu-se que são necessários 4 capacitores em paralelo para atender a corrente eficaz. O valor elevado de capacitância foi escolhido com base no RSE, visto que em capacitores eletrolíticos, em geral, a resistência série diminui quando a capacitância aumenta.

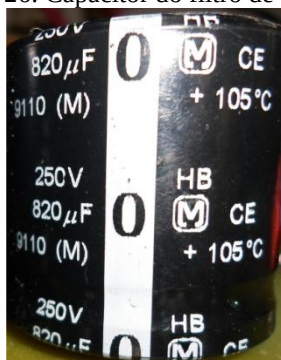
A Tabela 10 apresenta a corrente eficaz em cada capacitor em função da quantidade de capacitores em paralelo.

Tabela 10: Corrente eficaz nos capacitores do filtro de entrada.

Capacitores em paralelo	1	2	3	4
Corrente eficaz em cada capacitor (A)	12,16	6,15	4,12	3,09
Máximo de corrente em cada cap. (A)	6,13	6,13	6,13	6,13

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26: Capacitor do filtro de entrada.



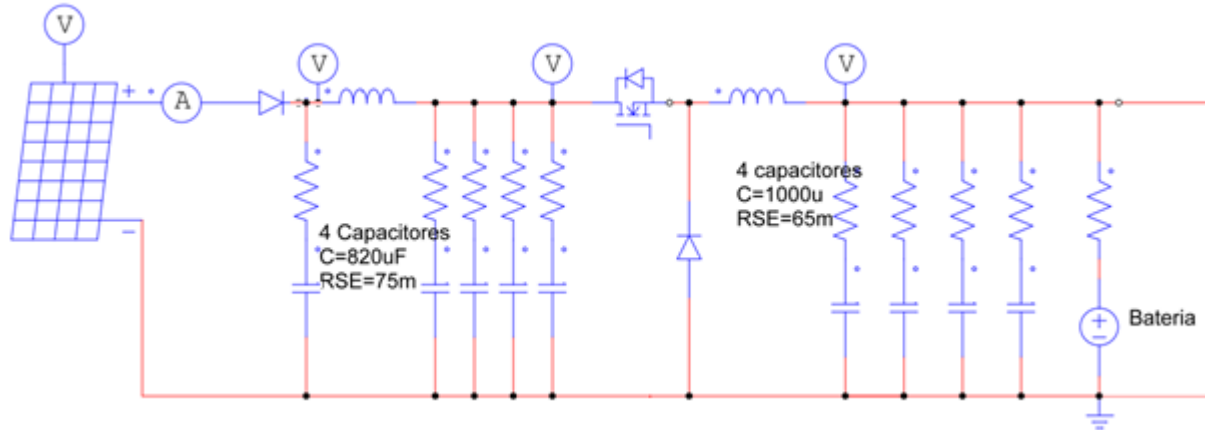
Fonte: Produção do próprio autor.

Verificou-se que a indutância série calculada é pequena, sendo menor que a própria indutância dos cabos que interligam os painéis fotovoltaicos ao conversor, com isso não foi necessária a construção deste indutor, evitando também a adição de mais um elemento magnético ao circuito, reduzindo o peso. Para a determinação da indutância dos cabos, foi considerado um comprimento médio dos cabos de conexão de 5m de comprimento e segundo os dados do fabricante dos cabos, a indutância é superior ao citado.

Para o dimensionamento dos capacitores foram realizadas simulações considerando a resistência série R_{se} dos capacitores e a resistência série das baterias. Foi considerado que o conversor Buck de entrada e o conversor Buck de saída estão operando com potência nominal em diferentes situações de razão cíclica. Pode-se observar na Figura 27 a estrutura utilizada nas simulações. Os valores de corrente eficaz que cada capacitor é submetido foi obtido a partir da pior situação, isto é, na situação que a corrente é maior nos capacitores. Com isso,

foram adicionados capacitores em paralelo com o objetivo de distribuir a corrente eficaz entre eles, tornando assim possível a utilização dos capacitores escolhidos para o projeto.

Figura 27 Circuito utilizado no dimensionamento dos capacitores.

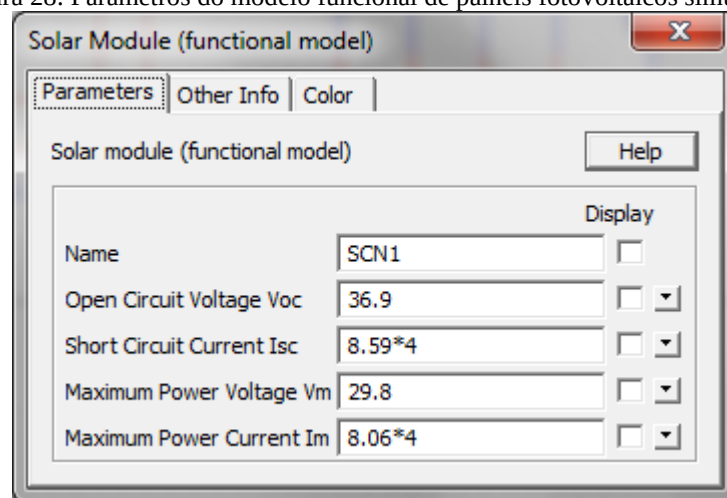


Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda, o conversor Buck de saída está conectado podendo assim ser verificado o comportamento da corrente nos capacitores em paralelo com a bateria e nas baterias com a influência dos dois conversores. O conversor Buck de saída não está apresentado na figura para melhor visualização da disposição dos capacitores.

Foi utilizado o modelo funcional de módulos fotovoltaicos. Os parâmetros utilizados no modelo do painel fotovoltaico estão a Figura 28, e pode-se verificar que foi considerada a conexão de quatro painéis fotovoltaicos em paralelo para este caso, pois as correntes de máxima potência e as correntes de curto circuito estão multiplicadas por quatro.

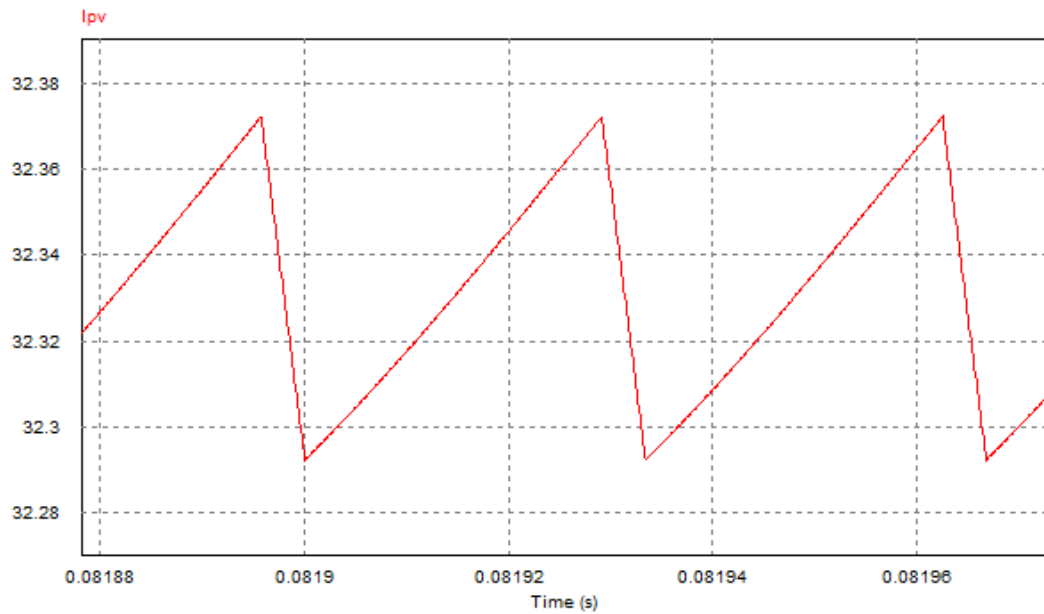
Figura 28: Parâmetros do modelo funcional de painéis fotovoltaicos simulados.



Fonte: Produção do próprio autor.

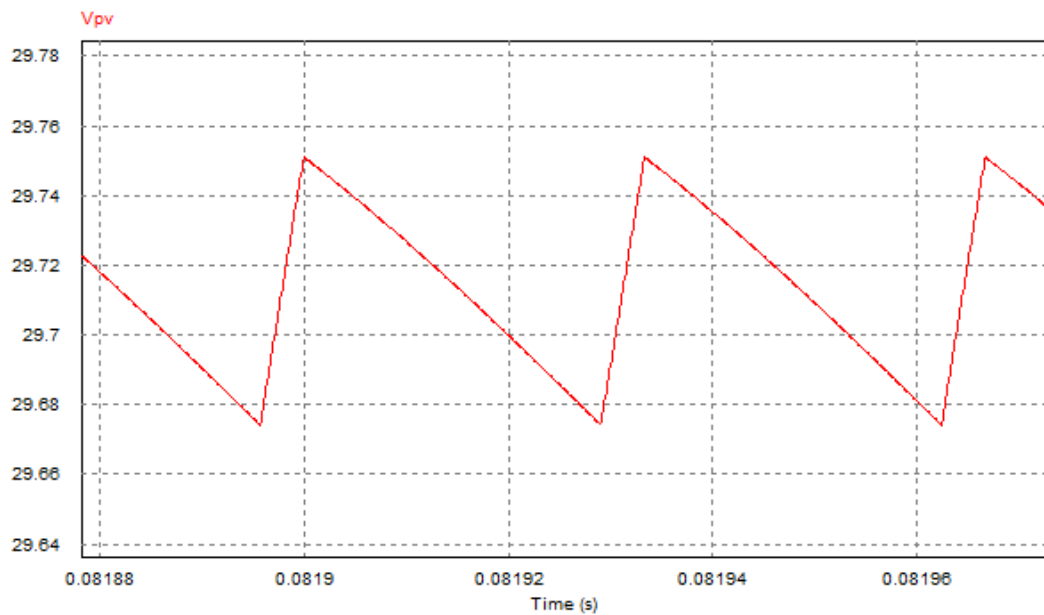
O resultado da corrente nos painéis fotovoltaicos está apresentado na Figura 29. A tensão nos painéis fotovoltaicos está apresentada na Figura 30. A tensão nos capacitores do filtro de entrada está apresentada na Figura 31 e a potência total absorvida pelos painéis está representada na Figura 32.

Figura 29: Corrente do painel fotovoltaico



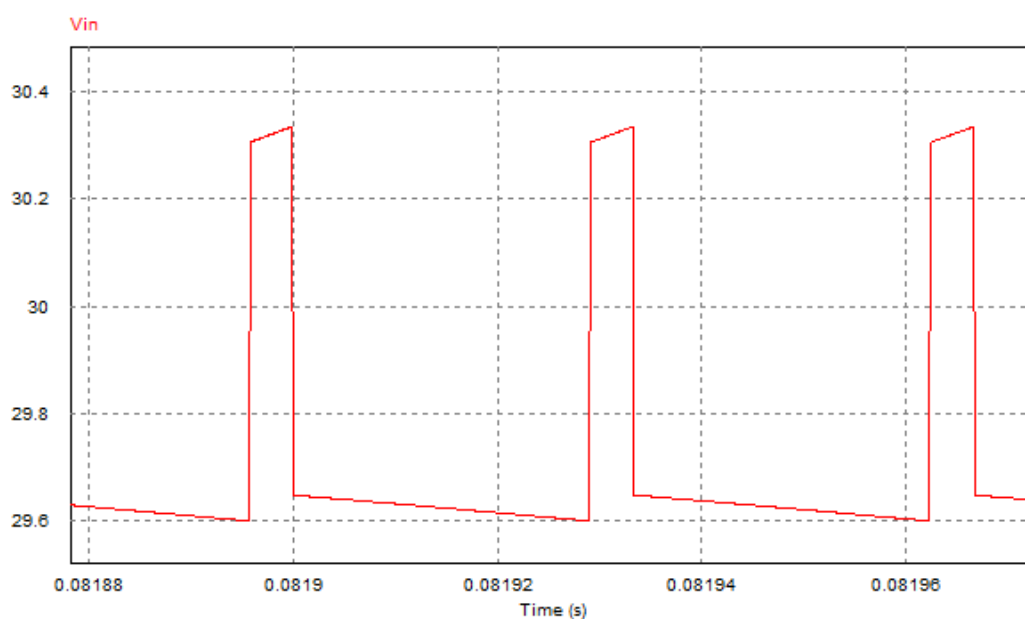
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30: Tensão no painel fotovoltaico



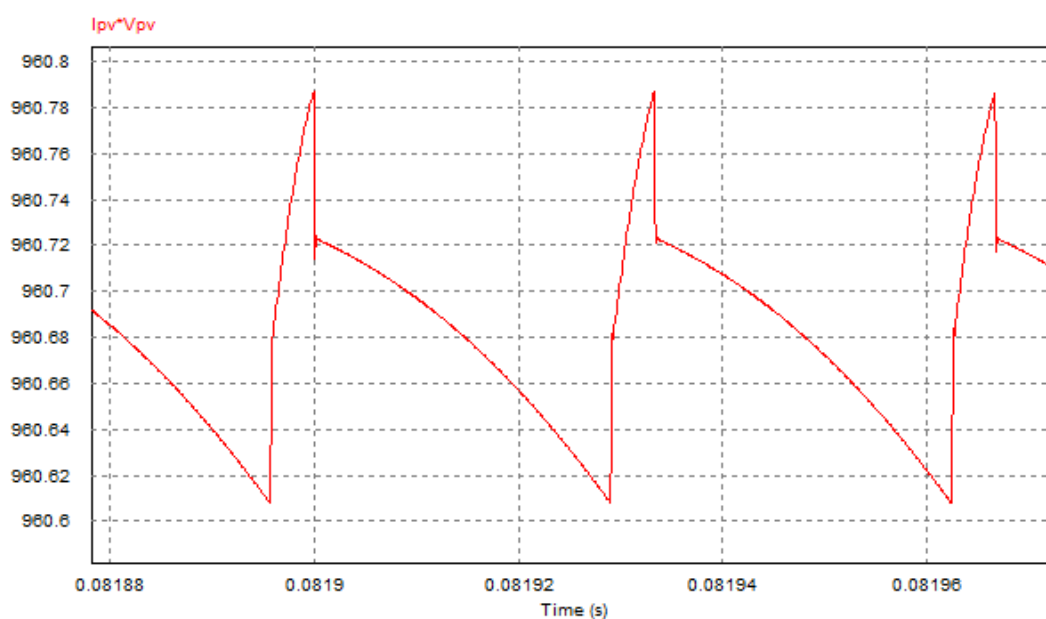
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31: Tensão nos capacitores do filtro de entrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32: Potencia do painel fotovoltaico.

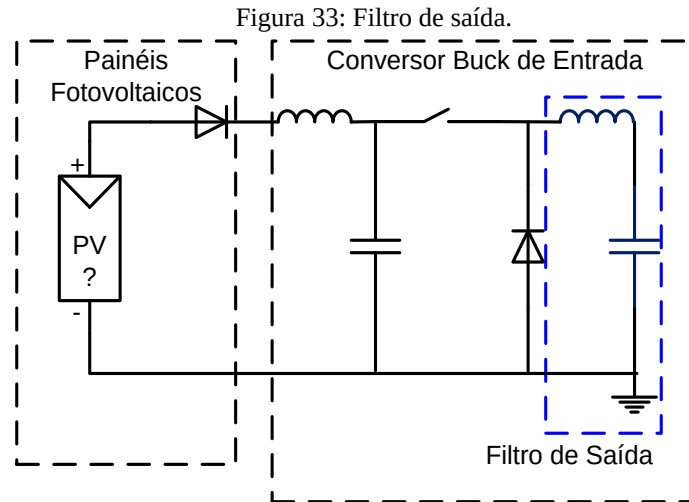


Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando as formas de onda acima pode-se observar que as ondulações de tensão e corrente estão muito abaixo da ondulação estipulada inicialmente. Isso se deve pelo fato que como o fator determinante na escolha dos capacitores foi o valor eficaz de corrente nos mesmos, a capacitância final é muito superior à projetada para atender a ondulação.

4.4 PROJETO DO FILTRO LC DE SAÍDA

Como já mencionado neste relatório, a saída do conversor Buck possui característica de fonte de corrente. Com isso é necessária a utilização de um indutor na saída do mesmo, juntamente com capacitores conforme a Figura 33. Os capacitores do filtro de saída estão em paralelo com a bateria, portanto sofrem esforços tanto do conversor Buck de entrada, quanto do conversor Buck de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Da mesma forma que com o filtro de entrada foi realizado o projeto do indutor e do capacitor conforme as equações 6.6 e 6.7 (BARBI e MARTINS, 2000).

$$L_{out} = \frac{V_{out}}{4 \cdot f \cdot \Delta I} = 116,98 \mu H \quad (6.6)$$

$$C_{out} = \frac{V_{out}}{31 \cdot L_{out} \cdot f^2 \cdot \Delta V} = 3,06 \mu F \quad (6.7)$$

Novamente, devido à resistência série dos capacitores e da capacidade máxima de corrente de eficaz dos capacitores, foram utilizados capacitores EPCOS de 1000 μF , disponíveis no laboratório. Através de simulações, foram adicionados capacitores em paralelo até que a corrente eficaz em cada um fosse inferior ao limite máximo.

A resistência série das baterias influencia fortemente na corrente dos capacitores de saída, bem como a ondulação de tensão. Para isso foram realizados testes para se obter a resistência série da bateria e compará-los com os valores do *Datasheet*. O teste consiste na medição da tensão da bateria em circuito aberto e compará-la com a tensão da bateria enquanto é drenada uma corrente elevada. Com a diferença de tensão e com a corrente drenada pode-se obter o valor da resistência através da lei de Ohm.

Os valores utilizados nas simulações são os valores medidos experimentalmente, pois os valores medidos eram superiores que os do *Datasheet*. A Tabela 11 apresenta a corrente eficaz nos capacitores do filtro em função da quantidade de capacitores associados em paralelo.

Tabela 11: Corrente nos capacitores do filtro de saída.

Capacitores em paralelo	1	2	3	4
Corrente eficaz em cada capacitor (A)	9,52	7,08	5,64	4,68
Máximo permitido em cada capacitor (A)	8,37	8,37	8,37	8,37

Fonte: Produção do próprio autor.

A indutância utilizada é a mesma que foi utilizada para o conversor Boost anterior que possui valor de $112\mu\text{H}$. Uma imagem do indutor está apresentada na Figura 34.

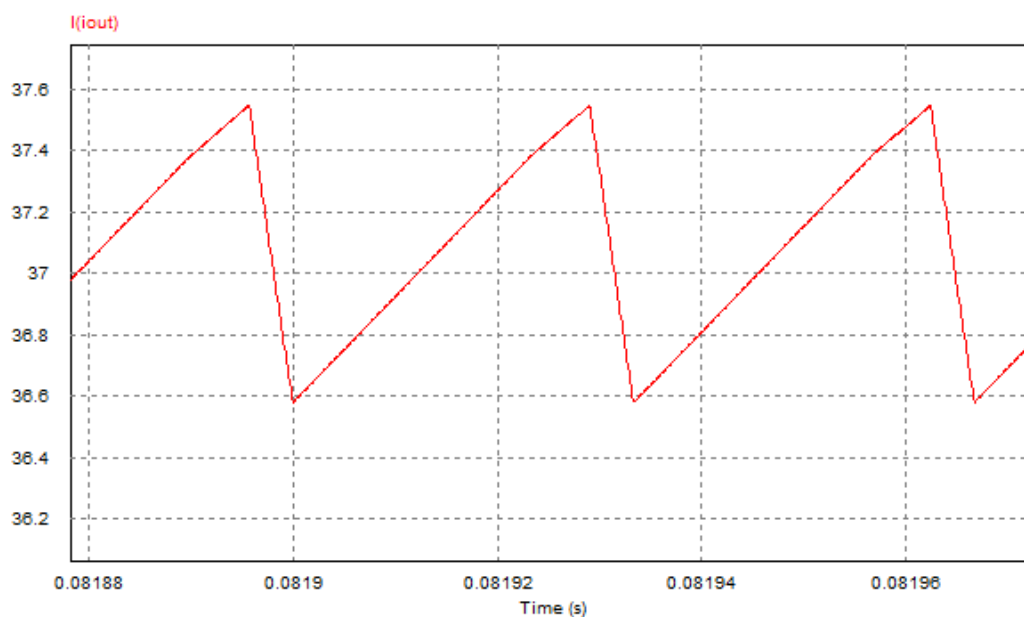
Figura 34: Indutor do filtro de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

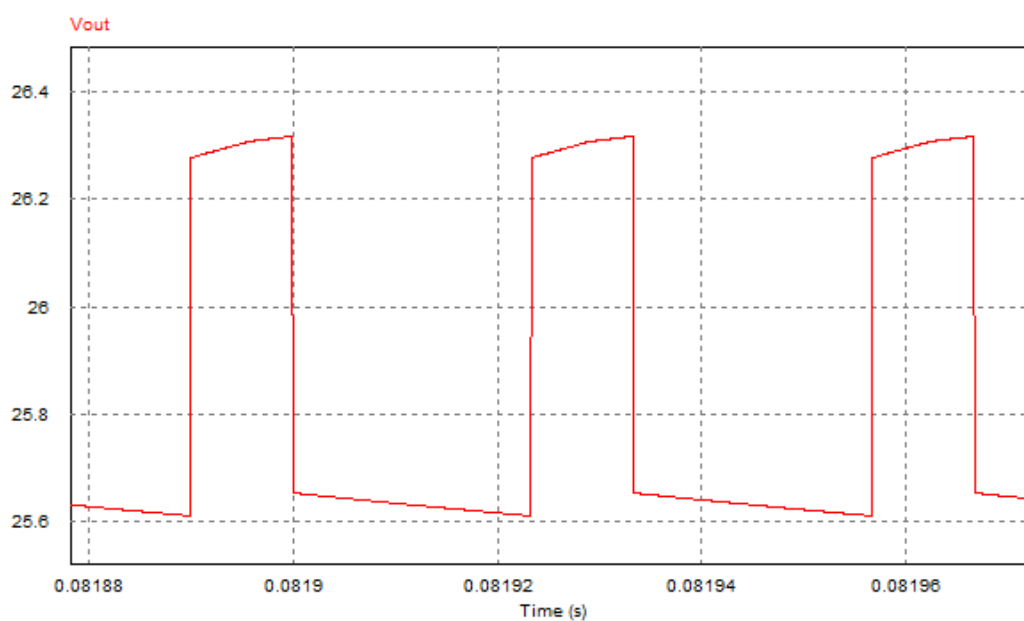
Os resultados da corrente no indutor de saída e da tensão de saída do filtro são mostrados na Figura 35 e na Figura 36.

Figura 35: Corrente no indutor do filtro de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36: Tensão no capacitor do filtro de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente pode-se observar que as ondulações de tensão obtidas através da simulação são inferiores às utilizadas no dimensionamento. Isso ocorre novamente pelo valor das capacitâncias ser muito maior que o valor mínimo calculado.

4.4.1 Perdas no indutor

A perda magnética no núcleo do indutor foi obtida através de seu volume e das características do material magnético. O valor da perda magnética é de 7,28 W. A perda de condução calculada para a corrente eficaz de 40 A é 2,96 W.

O total de perdas no indutor é 10,24 W.

4.5 PROJETO DO CONVERSOR BUCK DE SAÍDA

O conversor Buck de saída é responsável pelo controle da energia entregue ao motor. O mesmo funciona em malha aberta, ou seja, o piloto do barco tem total controle na quantidade de energia enviada para o motor. A velocidade da embarcação é proporcional à energia entregue, portanto pode-se dizer que o potenciômetro disponível no painel de comando é o acelerador do barco.

O conversor opera também na frequência de 30 kHz, e para o projeto do conversor foi considerada uma corrente nominal de 80 A no motor, operando com razão cíclica fixa em torno de 0,7. Foi verificado empiricamente durante a última competição que com a hélice utilizada a corrente máxima absorvida pelo motor é de 60 A. Porém o projeto foi realizado para uma corrente superior, tornando possível o aumento da potência da hélice.

4.5.1 Diodo de roda livre

Os esforços de corrente e tensão no diodo de roda livre são:

- Tensão reversa máxima: 26 V
- Corrente média: 23,95 A
- Corrente eficaz: 43,73 A

O diodo utilizado é o MBR6045, o mesmo que foi utilizado no conversor Buck de entrada, pois apresenta boas características de condução e a sua comutação não gera perdas. Porém para este caso foram utilizados quatro diodos em paralelo.

A perda total em cada diodo foi de 3 W. Como está se utilizando 4 diodos, 2 para cada encapsulamento, a perda total calculada é de 12 W.

4.5.2 Interruptor

Os esforços de corrente e tensão do interruptor são:

- Corrente média: 55,88 A
- Corrente eficaz: 66,8 A
- Tensão máxima reversa: 26 V

O interruptor utilizado é o IRF3207, o mesmo que foi utilizado no conversor Buck de entrada. Para este conversor foram utilizados 3 interruptores em paralelo para dividir a corrente entre eles, reduzindo as perdas.

A perda de comutação para cada interruptor é de 2,03W e a perda de condução 2,69W, totalizando 4,76 W de perda em cada interruptor. Como são utilizados três interruptores em paralelo, a perda total é de 14,15W. Não foi considerado desequilíbrio nas correntes para o cálculo de perdas de condução.

4.6 CÁLCULO TÉRMICO

Para o cálculo térmico dos componentes foi considerada uma temperatura ambiente de 60°C. Esta temperatura é aceitável se for levado em conta que o conversor estará localizado no interior do casco da embarcação sem realizar consideráveis trocas térmicas com o meio externo. A temperatura máxima de junção admitida foi de 90°C, permitindo assim uma variação máxima de 30°C entre a junção e o ambiente.

Os diodos de roda livre e os interruptores do conversor Buck de entrada estão localizados no mesmo dissipador, o mesmo ocorre com os componentes do conversor Buck de saída. Assim o conversor possui dois dissipadores distintos, um para cada estágio de conversão. Para a escolha dos dissipadores utilizados foi levada em conta a disponibilidade dos mesmos no laboratório, ou seja, depois de calculados os valores da resistência térmica máxima de cada dissipador foram escolhidos os dissipadores presentes no laboratório que atendessem a especificação de resistência térmica.

A seguir serão apresentados os cálculos térmicos para a determinação da resistência térmica máxima admitida para cada um dos dissipadores.

4.6.1 Dissipador do Conversor Buck de Entrada

Para determinar o dissipador deve-se primeiramente calcular a potência total dissipada. As perdas no dissipador de entrada totais estão apresentadas na Tabela 12 a seguir. A resistência térmica entre junção-cápsula e cápsula-dissipador de cada componente estão apresentadas também na Tabela 12.

Tabela 12: Dados utilizados para o projeto do dissipador de entrada.

Perda do diodo de roda livre:	2,06 W
Perda em cada interruptor	2,71 W
Perda Total	7,49 W
Rjc Diodo	0,50 °C / W

Rcd Diodo	0,24 °C / W
Rjc MOSFET	0,45 °C / W
Rcd MOSFET	0,50 °C / W

Fonte: Produção do próprio autor.

Como o dissipador apresenta componentes distintos, é necessário calcular para qual componente a temperatura é crítica a partir dos dados de Rjc e Rcd. O componente que possuir maior perda associada a valores de resistência elevados apresentará uma maior elevação de temperatura, por isso o dissipador deve ser dimensionado para atender a variação máxima de temperatura deste componente crítico.

Para o dissipador de entrada o componente crítico é o diodo de roda livre, podendo admitir uma variação máxima de 27 °C. Para isso o dissipador necessário deve possuir no máximo 3,66 °C/W de resistência térmica.

Para a determinação do valor da resistência térmica do dissipador foi utilizado o catálogo do fabricante HS Dissipadores e obtido o valor da resistência térmica do modelo. O dissipador escolhido possui resistência térmica de 3,2 °C/W.

4.6.2 Dissipador do Conversor Buck de Saída

As perdas no dissipador de saída totais estão apresentadas na Tabela 13 a seguir. A resistência térmica entre junção-cápsula e cápsula-dissipador de cada componente está apresentada também na Tabela 13.

Tabela 13: Dados utilizados para o projeto do dissipador de saída.

Perda do diodo de roda livre:	6 W
Perda em cada interruptor	4,72 W
Perda Total	26,15 W
Rjc Diodo	0,5 °C / W
Rcd Diodo	0,24 °C / W
Rjc MOSFET	0,45 °C / W
Rcd MOSFET	0,50 °C / W

Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente para este dissipador o componente crítico é o diodo de roda livre. Neste caso o dissipador só pode permitir uma variação de 25,52 °C em relação à temperatura ambiente, para isso o dissipador deve possuir no máximo 0,976 °C/W.

Para a determinação do valor da resistência térmica do dissipador foi utilizado o catálogo do fabricante HS Dissipadores e obtido o valor da resistência térmica do modelo. O dissipador utilizado possui resistência térmica de $0,92\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ sem ventilação forçada.

4.7 VENTILAÇÃO FORÇADA

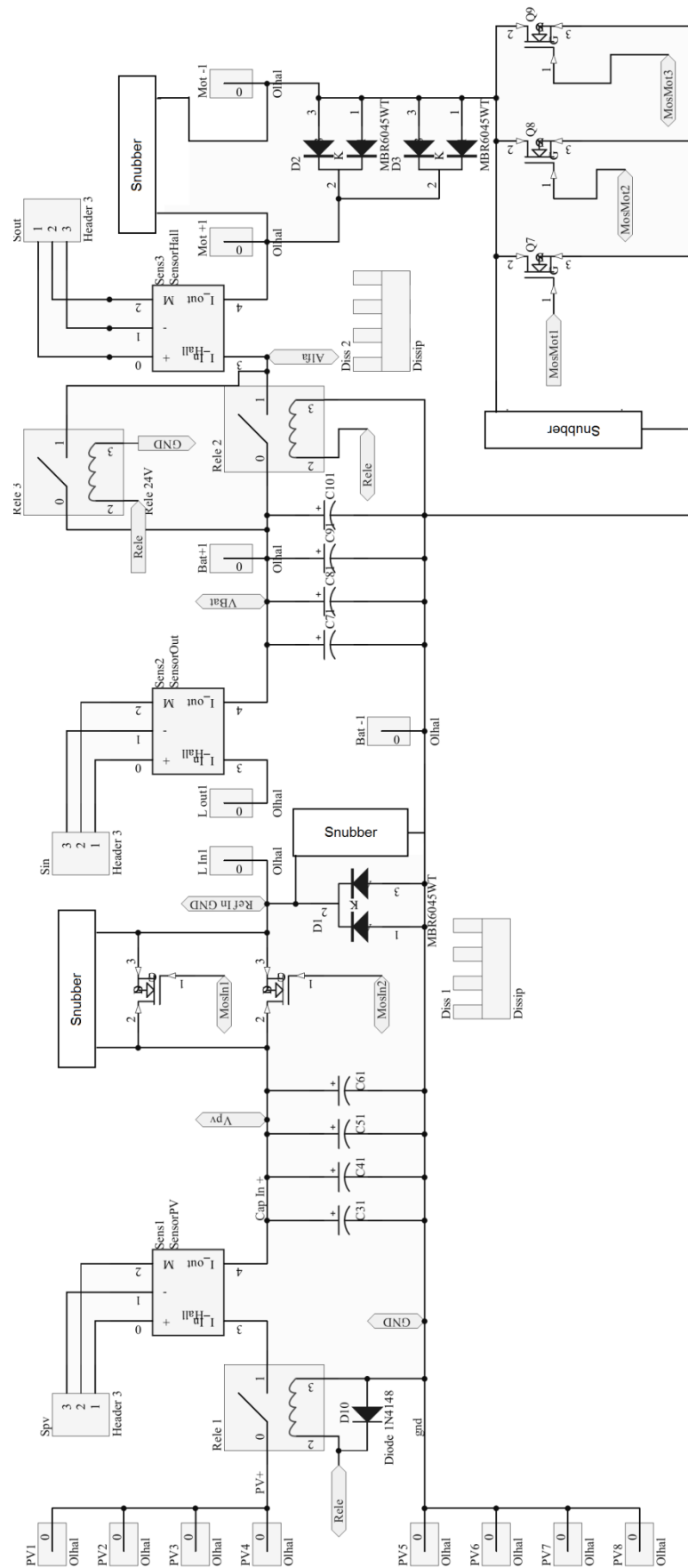
As placas dos conversores e dos circuitos auxiliares ficam dispostas em uma caixa no interior do casco. De acordo com a regulamentação da competição deve haver ventilação forçada entre a caixa dos componentes elétricos e o restante do casco. A caixa onde estão localizadas as baterias também necessita desta ventilação forçada para retirar os gases que são gerados pelas baterias e evitar qualquer tipo de acidente.

A influência da ventilação forçada não foi considerada no dimensionamento dos dissipadores, porém haverá uma circulação de ar que proporcionará uma redução na resistência térmica dos dissipadores.

5 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PLACA DE POTÊNCIA

O circuito geral da placa de potência está apresentado na Figura 37. Foram adicionados relés em pontos do circuito para facilitar a operação da embarcação: um relé em série com os painéis, podendo ser aberto em períodos noturnos ou de baixa irradiação. Também há um relé em série com o motor para desligar o motor em caso de emergência ou enquanto a embarcação não estiver competindo e apenas carregando as baterias.

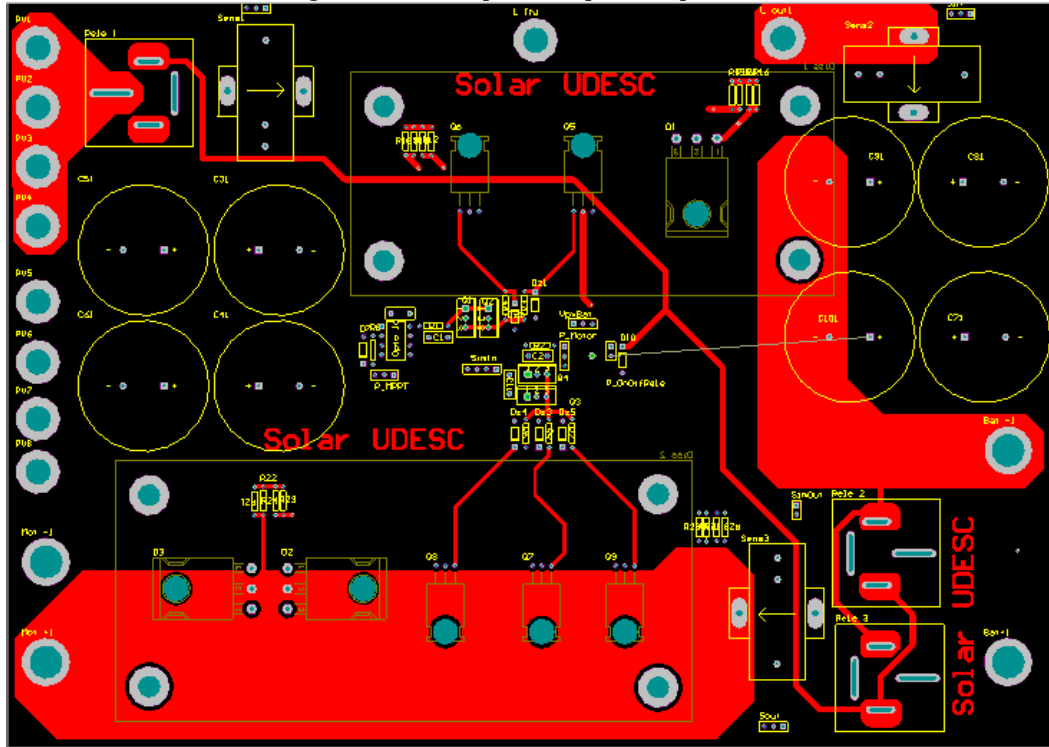
Figura 37: Circuito de potência.



Fonte: Produção do próprio autor.

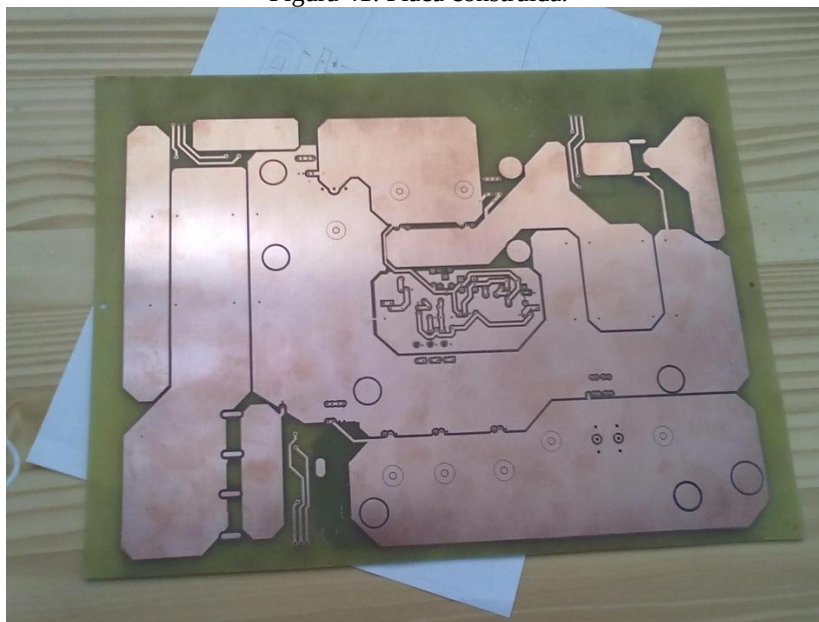
A construção do layout da placa foi feita de acordo com o circuito apresentado na Figura 37. Foi utilizada uma placa cobreada dupla-face de 2 onças adotando-se a medida de 2 A/mm para largura mínima das trilhas. Nas Figura 38 e Figura 39 estão apresentadas as duas faces da placa.

Figura 38: Face superior da placa de potência.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41: Placa construída.

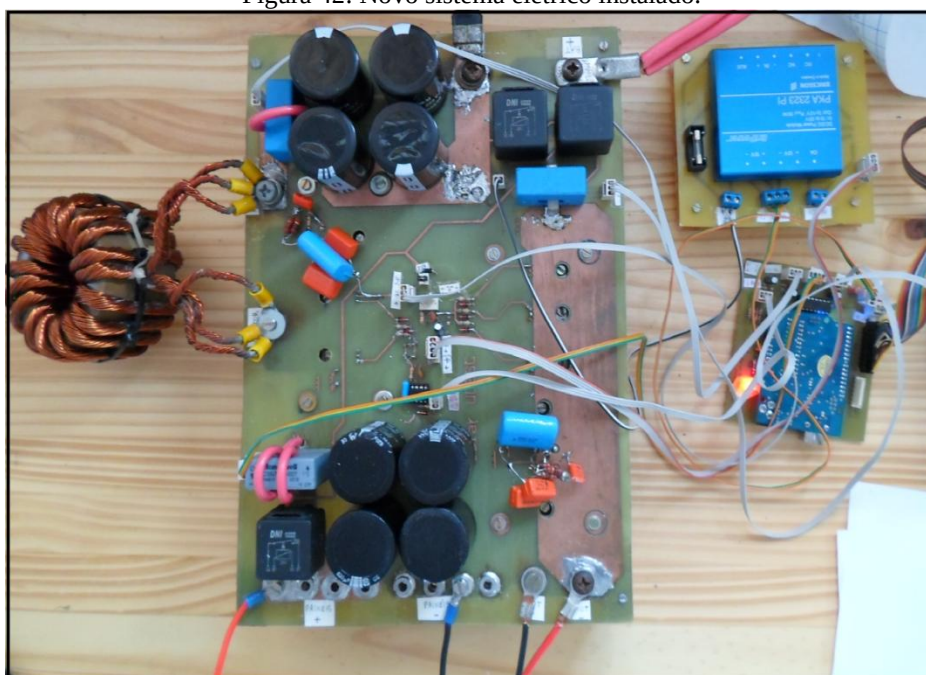


Fonte: Produção do próprio autor.

Os furos para inserção dos componentes e dos conectores de potência não foram realizados na imagem da placa construída.

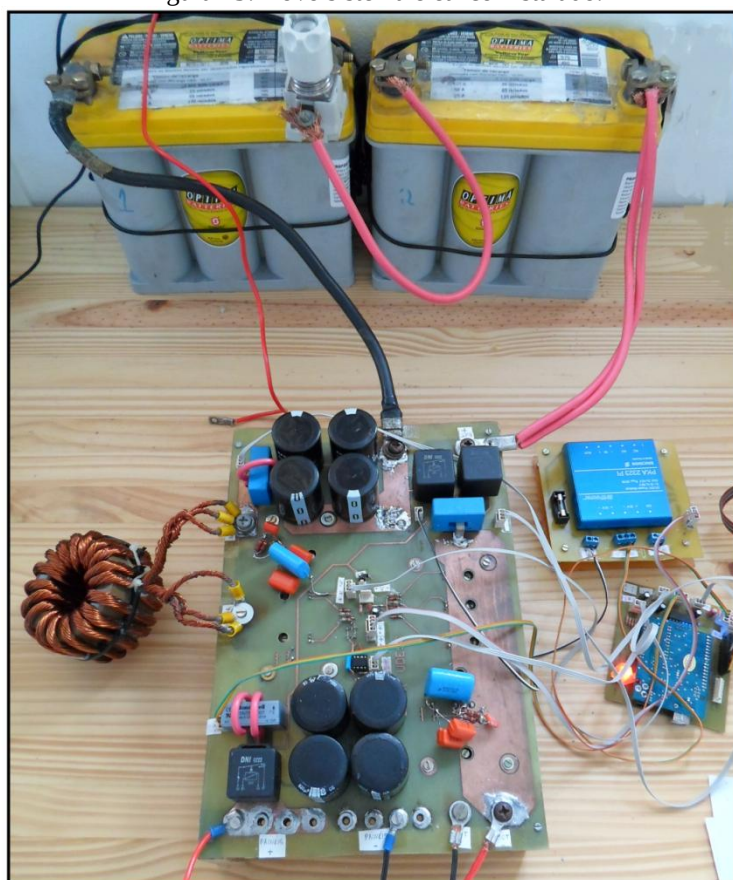
Todo o circuito de potência do sistema elétrico está contido somente em uma placa, reduzindo significativamente a quantidade de cabos de potência interligando as placas de potência que por terem seção de 35 mm² são pouco maleáveis e difíceis de trabalhar. Os únicos cabos de potência presentes são os cabos que ligam as baterias e os cabos que vão ao motor. Os demais são cabos de sinal, comando e os cabos dos painéis fotovoltaicos. Na Figura 42 e na Figura 43 pode-se observar o sistema elétrico desenvolvido.

Figura 42: Novo sistema elétrico instalado.



Fonte: Produção do próprio autor.

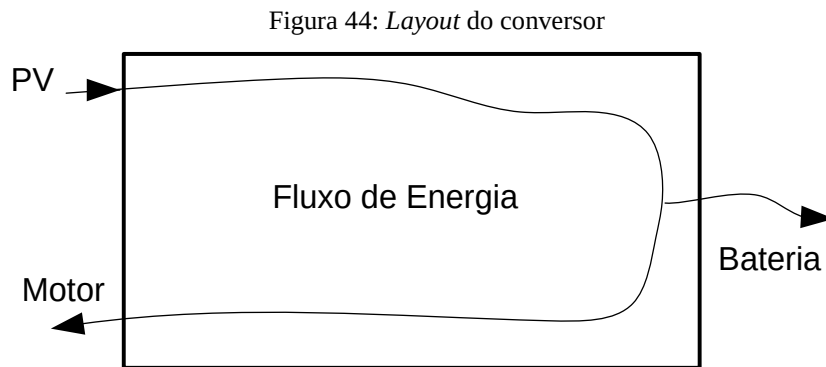
Figura 43: Novo sistema elétrico instalado.



Fonte: Produção do próprio autor.

A quantidade de cabos de potência e a complexidade do circuito foram reduzidas. A dificuldade da instalação consiste em conectar os cabos dos sensores de tensão, corrente e

alimentação na placa do conversor. Outro aspecto foi a adequação do *layout* do conversor para a instalação do mesmo no barco. Como a estrutura se manteve a mesma, para o projeto do *layout* foi considerado que as baterias estão localizadas ao lado direito do conversor, e que os cabos que vêm dos painéis fotovoltaicos e os cabos que vão para o motor são conectados pelo lado esquerdo. Para isso, o *layout* do conversor apresenta a estrutura básica de fluxo de energia conforme a Figura 44.



Fonte: Produção do próprio autor.

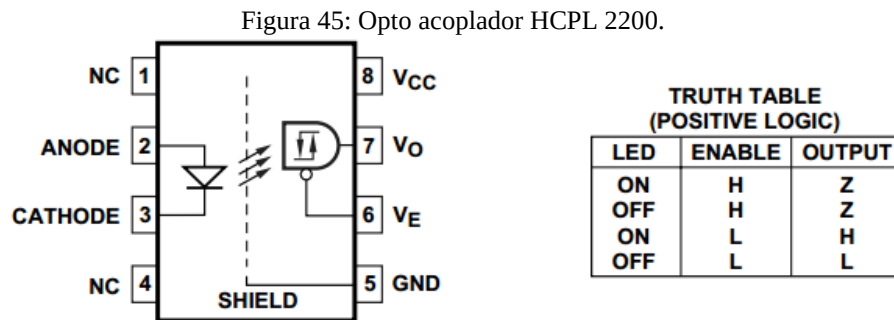
6 CIRCUITOS AUXILIARES

Neste capítulo serão apresentados os principais circuitos auxiliares que estão presentes no sistema elétrico da embarcação, como os drivers, opto-acoplador e microcontrolador.

6.1 OPTO-ACOPLADOR

Para obter a isolamento necessária entre o comando do microcontrolador e a referência do interruptor do conversor BUCK na entrada é necessária a utilização de um circuito isolador. Para este conversor foi escolhida a utilização de um opto-acoplador, devido a sua simplicidade de operação e velocidade.

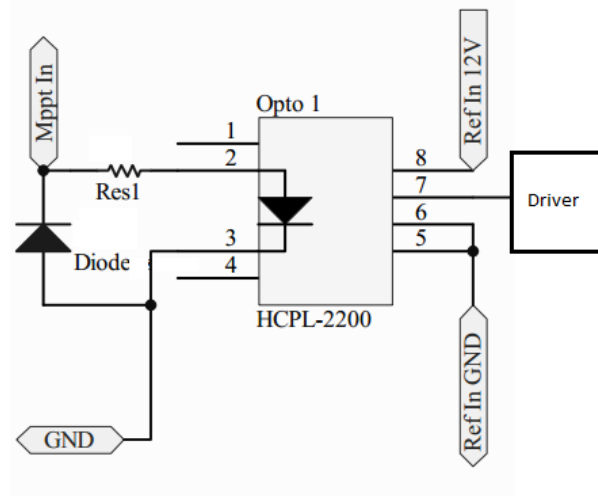
O opto-acoplador utilizado é do modelo HCPL – 2200. Seu diagrama funcional está representado na Figura 45.



Fonte: adaptado de AVAGO, 2007

Pode-se observar na Figura 46, quando o pino 6 de *enable* está conectado ao terra, a saída do opto acoplador (pino7) segue a entrada do mesmo, fazendo com que seja possível converter um comando de uma referência para outra. Neste caso o pino 5 é conectado à referência isolada de comando do interruptor conforme o esquema apresentado na Figura 46. Para isso é necessária a utilização de uma fonte isolada auxiliar.

Figura 46: Esquema de ligação do opto acoplador.



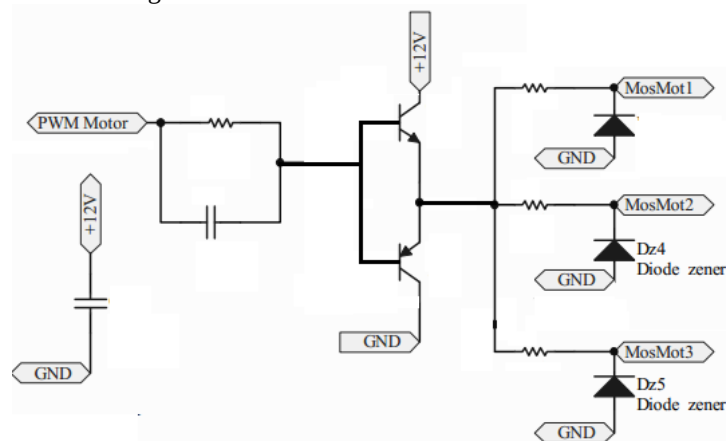
Fonte: Produção do próprio autor.

6.2 DRIVER DE ACIONAMENTO DOS MOSFET

Para acionar os interruptores (MOSFET) do conversor é necessária a utilização de um driver que proporcione um ganho de capacidade de corrente para o PWM. A capacidade de corrente do opto-acoplador ou do circuito LM3525 não são suficientes para atender a necessidade de carga rápida da capacitância de entrada do gatilho dos interruptores MOSFET. O resistor de gatilho utilizado foi o mesmo utilizado no sistema elétrico anterior com o valor de 10 Ω .

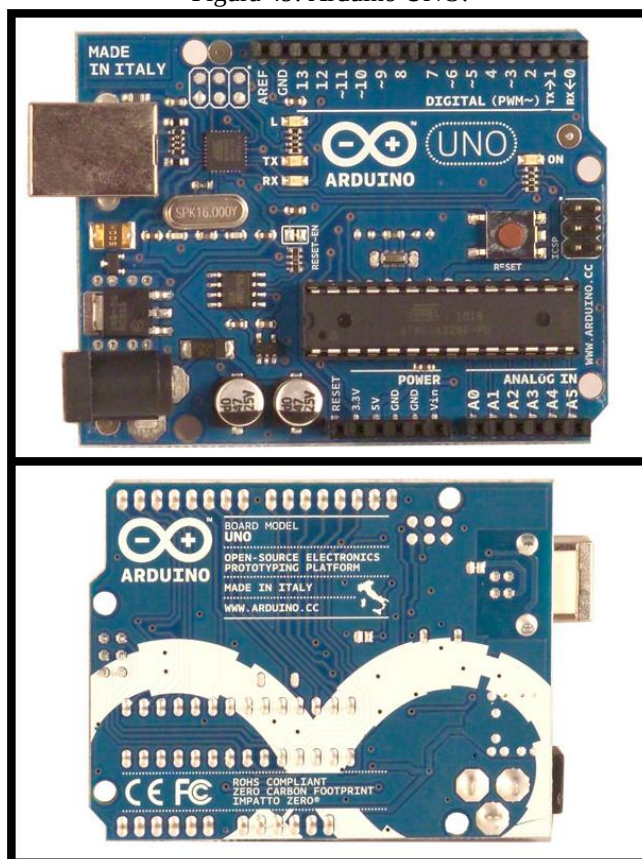
Para isso foi escolhida a estrutura *toten pole*, com dois transistores, um NPN e um PNP conforme será representado a seguir. Os transistores utilizados são do modelo TIP41(NPN) e TIP42(PNP). São dois modelos distintos de driver pois o acionamento dos MOSFET do conversor Buck de entrada deve ser isolado, já o acionamento dos MOSFET do conversor Buck de saída não necessita da isolação. O esquema do driver não isolado está apresentado na Figura 47 e o driver isolado está apresentado na Figura 48.

Figura 47: Driver do conversor Buck de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 49: Arduino UNO.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para realização das medidas dos sensores de tensão e corrente é utilizado o conversor AD. Para isso o mesmo possui uma referência interna que pode ser configurada para 5 V, 3,3V ou até mesmo ser utilizado uma alimentação externa. Foi utilizada como referência do conversor AD a tensão 3,3V que é gerada internamente.

Os conversores AD do ATmega328 possuem resolução de 8 bits, podendo retornar qualquer valor entre 0 e 255 (fundo de escala). Quando a tensão medida for 0 V, o conversor AD retorna valor 0. A tensão de referência determina o valor digital de fundo de escala que será medido pelo microcontrolador, ou seja, quando o valor da tensão no pino que é realizada a medição for igual a 3,3V o conversor AD retorna o valor 255. Para efetuar as medidas, o controlador realiza 50 amostras e obtêm o valor médio entre elas.

A alimentação do microcontrolador é feita através do pino Vin. O mesmo é alimentado com 12 V da fonte auxiliar isolada que é utilizada na alimentação dos demais circuitos de comando do conversor.

O microcontrolador ATmega328 possui função PWM, com frequência fixa, porém ajustável. Foi utilizada a frequência de 32kHz para o comando do conversor Buck que realiza o MPPT, já que o projeto de potência foi realizado para esta frequência de comutação.

A técnica de MPPT utilizada foi com passo fixo de perturbação e observação apresentada nos capítulo de técnicas de MPPT.

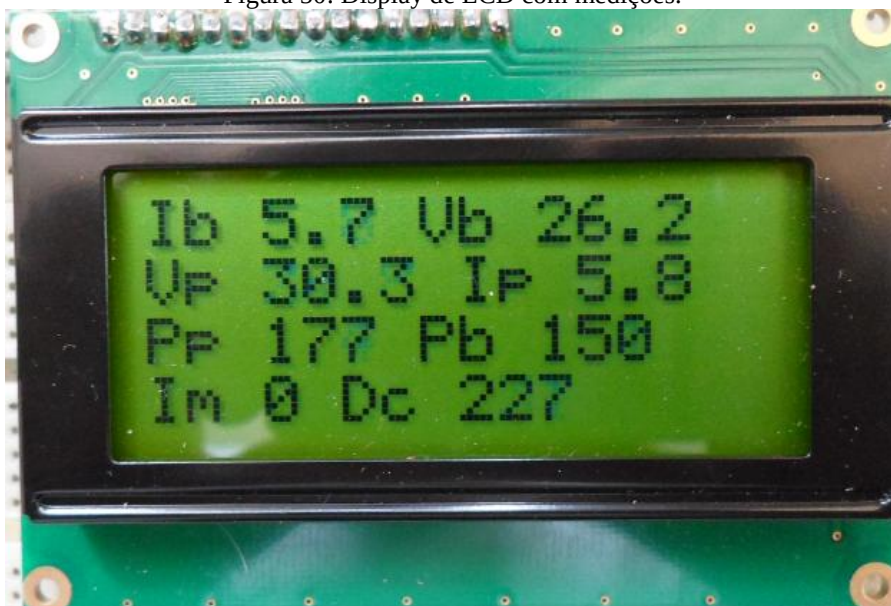
Outro item importante para adicionar mais confiabilidade para o sistema elétrico é a utilização de *Watchdog* do microcontrolador, pois caso ocorra algum evento inesperado que possa ocasionar o travamento do microcontrolador, o mesmo se reinicia automaticamente após algum tempo pré-determinado. Além disso, um botão de reset é levado até o painel de comando do barco, e caso for observado qualquer tipo de anomalia no funcionamento, o piloto pode reiniciar o microcontrolador manualmente.

Os dados medidos pelo Arduino além de serem utilizados para realizar o controle do conversor (MPPT) são enviados para um display LCD, localizado no painel de comando do barco para que o piloto possa acompanhar algumas medidas importantes. Dentre elas serão citadas as mais importantes a seguir:

- Medição da tensão da bateria, analogamente ao medidor de combustível de um automóvel convencional, pois com a tensão da bateria pode-se determinar a quantidade de carga restante na mesma.
- Medição da corrente da bateria, para que seja possível verificar se a bateria está sendo carregada ou descarregada, e também o quanto de corrente está sendo fornecida ou drenada.
- Medição da potência entregue ao motor, através das medições de tensão e corrente.
- Medição da potência entregue pelos painéis fotovoltaicos.

Pode-se observar na Figura 50 uma imagem do display LCD com as informações exibidas.

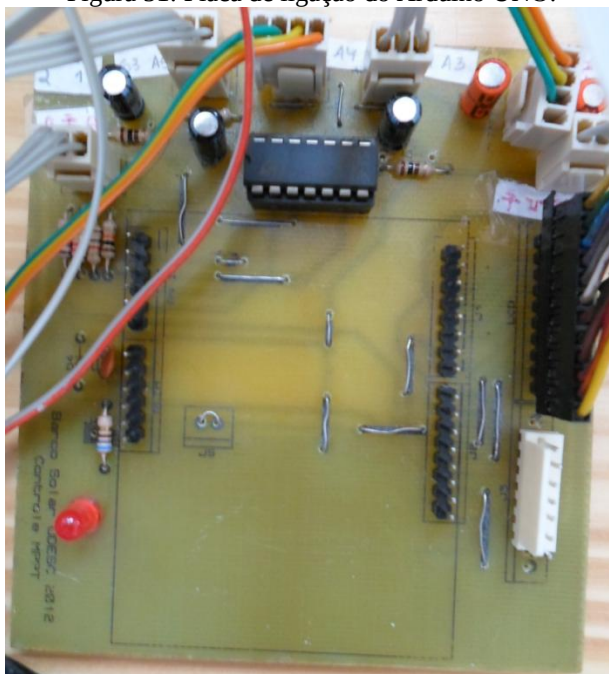
Figura 50: Display de LCD com medições.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para facilitar a utilização do kit Arduino nas placas de potência, foi confeccionada uma placa na qual o Arduino se encaixa. Assim todos os pinos do microcontrolador estão disponíveis através de conectores, como pode-se observar na Figura 51.

Figura 51: Placa de ligação do Arduino UNO.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.4 SNUBBERS

A utilização de snubbers é necessária para a viabilização da implementação do conversor reduzindo as oscilações e picos de tensão no momento da comutação. A comutação

dos conversores pode gerar oscilações na tensão no momento do bloqueio e entrada em condução que podem ser superiores aos valores máximos permitidos pelos componentes, para isso os snubbers tem a função de amortecer as oscilações e limitar a tensão. Porém, apesar de reduzir as perdas nos componentes durante a comutação e reduzir as perturbações das comutações, os snubbers acrescentam perdas ao conversor. Existem snubbers que regeneram a energia absorvida durante a comutação, porém estes não serão utilizados neste projeto.

Para determinação dos componentes dos snubbers, tanto no conversor de entrada quanto no de saída, foram realizadas medidas analisando a comutação e testando diferentes tipos de snubber e diferentes valores de componentes. O snubber RC se mostrou muito eficaz para ambos os conversores, sendo apenas necessária sua utilização no diodo de roda livre, pois como são diodos Schottky, a sua capacitância intrínseca juntamente com as indutâncias parasitas do layout ocasionaram transitórios de tensão causando picos de tensão sobre o diodo. Como a tensão máxima reversa dos interruptores é bastante elevada, o uso de snubber para os interruptores não é necessário, evitando gerar mais perdas no conversor. Podem-se verificar as formas de onda de comutação no capítulo que apresenta os resultados experimentais.

Os snubbers utilizados estão apresentados na Figura 52, juntamente com os capacitores que auxiliam a comutação.

Figura 52: Snubber dos conversores.



Fonte: Produção do próprio autor.

7 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA E ANÁLISE DE PERDAS

Neste capítulo será realizada uma análise das perdas do conversor. A Tabela 14 apresenta as perdas existentes no sistema elétrico considerando operação na potência nominal de ambos os conversores. Esta situação consiste em 960 W de energia absorvida dos painéis fotovoltaicos e motor com corrente de 80 A. Esta situação é pouco provável, porém será levada em conta para obter a menor eficiência do conversor.

O item Potência consumida pelo sistema representa o quanto de potência é utilizada para energizar os elementos do sistema elétrico que são: microcontrolador, relés, circuitos de comando, sensores de corrente, circuitos de driver e fonte auxiliar.

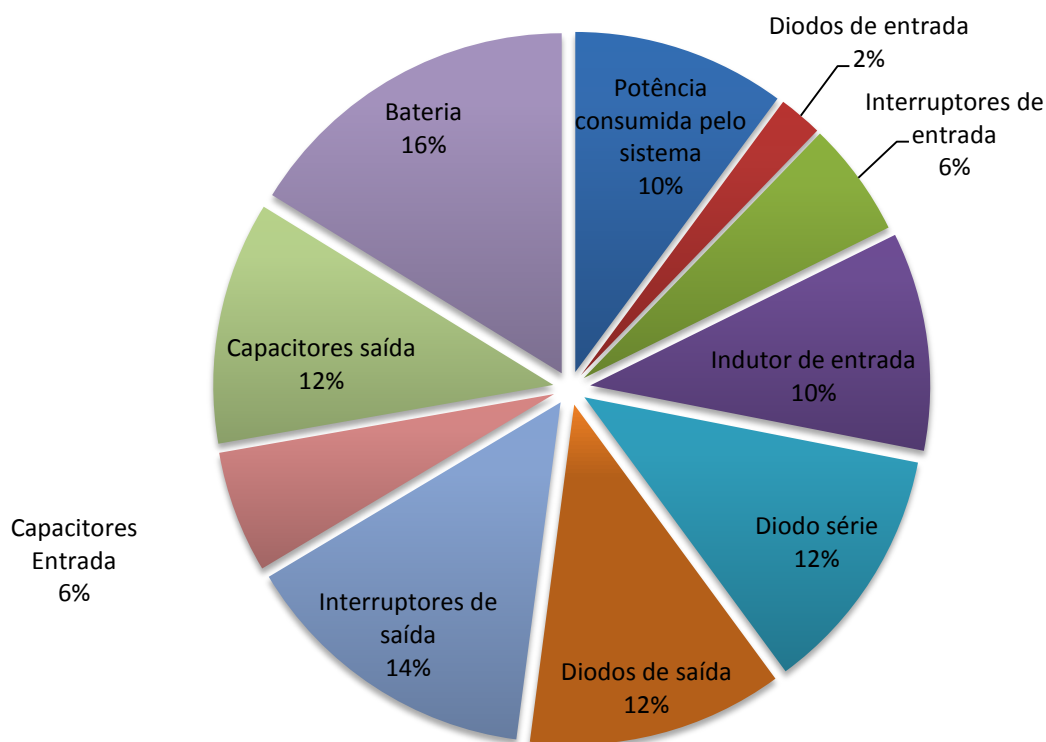
Tabela 14: Distribuição das perdas

Elemento	Perda [W]
Potência consumida pelo sistema	10
Diodos do conversor Buck de entrada	2,06
Interruptores do conversor Buck de entrada	5,4
Indutor do filtro de saída	10,24
Diodo em série com os painéis fotovoltaicos	11,68
Diodos do conversor Buck de saída	12
Interruptores do conversor Buck de saída	14,15
Capacitores do filtro de Entrada	5,73
Capacitores do filtro de saída	11,39
Baterias	16
Total	98,65

Fonte: Produção do próprio autor.

Para melhor visualização, a Figura 53 apresenta a distribuição de perdas graficamente.

Figura 53: Distribuição das perdas.



Fonte: Produção do próprio autor.

A eficiência total do sistema elétrico foi obtida através de simulação e dos cálculos das perdas apresentados anteriormente. As simulações levam em conta a RSE dos capacitores e a resistência da bateria.

Os resultados obtidos pela simulação, adicionadas as perdas calculadas estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Eficiência esperada com o sistema em potencia nominal

Elemento	Potência [W]
Potência Absorvida dos painéis	962,8
Potência absorvida das baterias	474,42
Perdas nos demais componentes	65,53
Potência entregue ao motor	1402,46
Potência total de entrada	1502,75
Potência de saída	1402,46
Eficiência	93,33%

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 15 pode-se concluir que a eficiência do sistema na situação apresentada é de 93,33%. Na prática espera-se que ocorram perdas

adicionais reduzindo a eficiência final do conversor como resistência nos contatos das conexões, no cobre da placa, nos cabos e as perdas nos snubbers que não foram consideradas no cálculo.

8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para obter os dados experimentais do conversor foram utilizados dois painéis fotovoltaicos presentes no laboratório do nPEE. Os painéis são do modelo SW 130 Poly do fabricante Sunmodule. As especificações deste modelo estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Dados do painel Sunmodule SW 130 Poly.

Desempenho Elétrico na Condição Padrão de Testes (STC)	
Potência Máxima (P_{max})	130 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mpp})	17.4 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mpp})	7.49 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	21.5 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	7.99 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Número de Células por Módulo	36

Fonte: Produção do próprio autor.

A estrutura foi montada ao lado do laboratório próximo à biblioteca como pode-se observar na Figura 54. Esta estrutura foi montada para validar o funcionamento do MPPT.

Figura 54: Estrutura utilizada para testes.



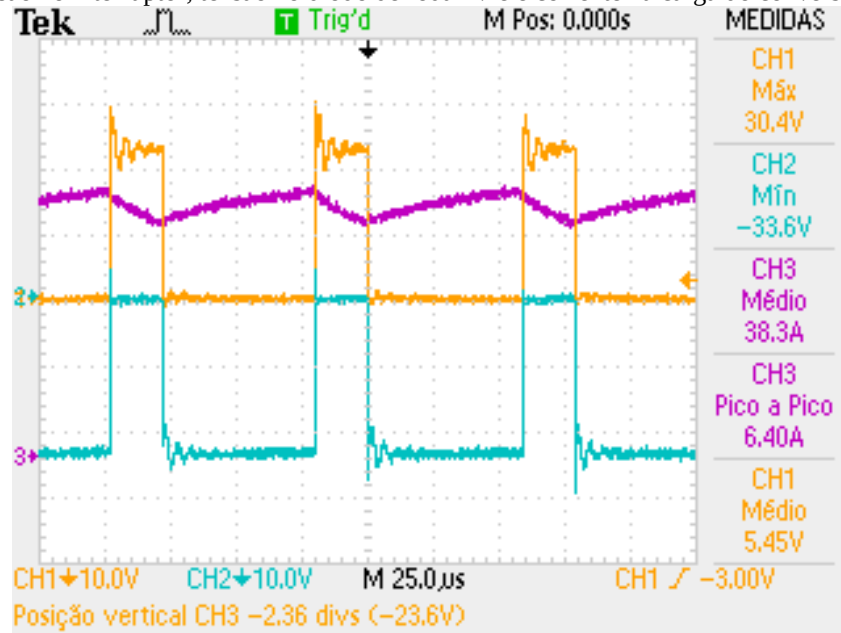
Fonte: Produção do próprio autor.

8.1 CONVERSOR BUCK DE SAÍDA

Na Figura 55 está apresentada a tensão no interruptor, tensão no diodo de roda livre e corrente na carga do conversor Buck de saída. Para a simulação de um motor elétrico, foi

utilizada uma carga RL visto que não havia possibilidade de realizar os testes com carga no motor elétrico da embarcação.

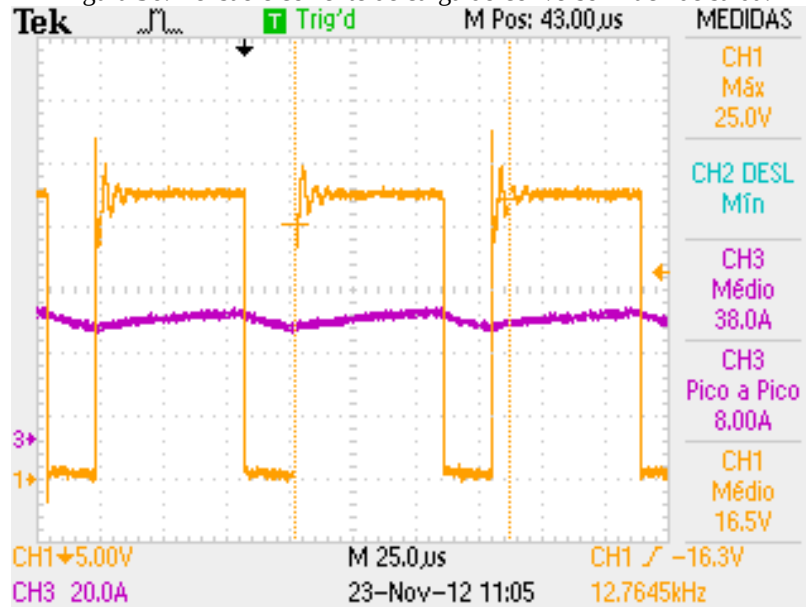
Figura 55: Tensão no interruptor, tensão no diodo de roda livre e corrente na carga do conversor Buck de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

A tensão na carga e a corrente na carga estão apresentadas na Figura 56.

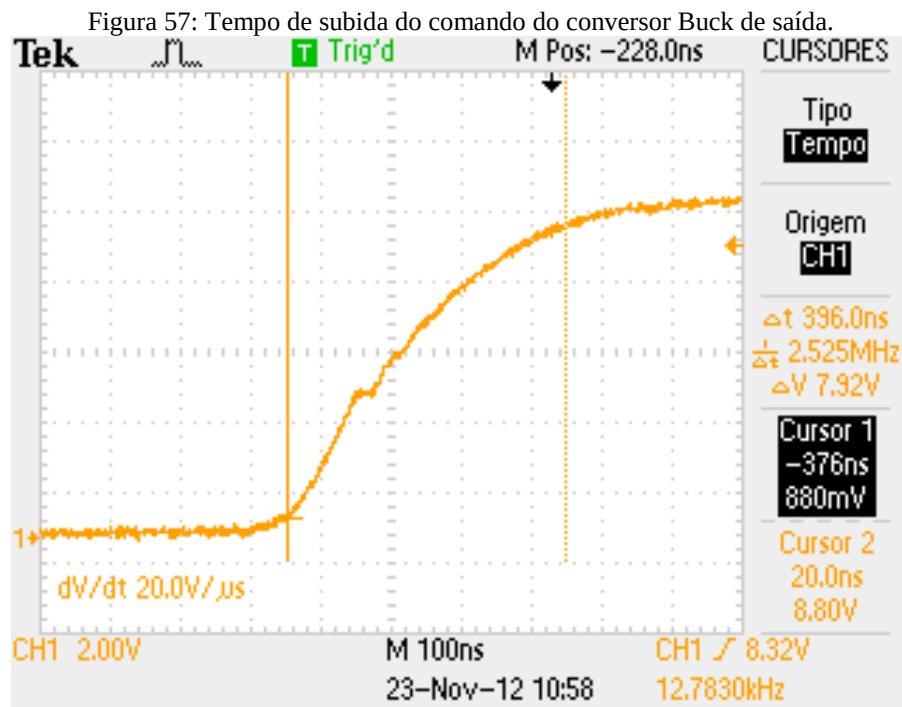
Figura 56: Tensão e corrente de carga do conversor Buck de saída.



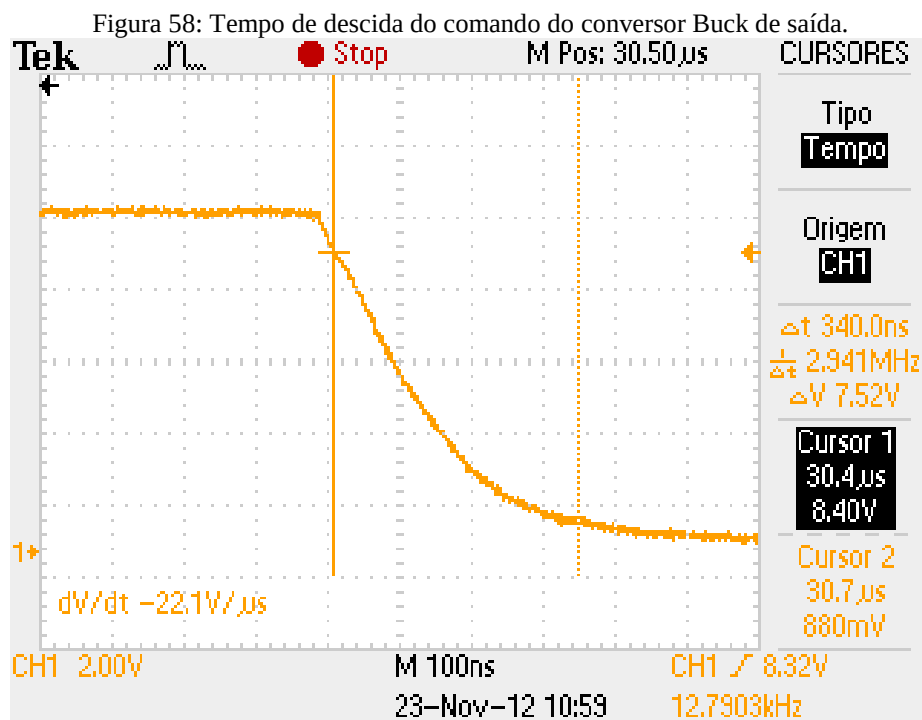
Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se verificar que a ondulação de corrente é de apenas 4 A, e o indutor utilizado para estas medições foi de 112 µH.

Os sinais de comando para os interruptores do conversor Buck de saída estão apresentados a seguir. A Figura 57 apresenta a subida do comando do interruptor, após o driver. A Figura 58 apresenta a descida do pulso de comando. Os tempos de comutação são superiores aos considerados no cálculo das perdas de comutação, podendo ocasionar erro no resultado final da eficiência do conversor.

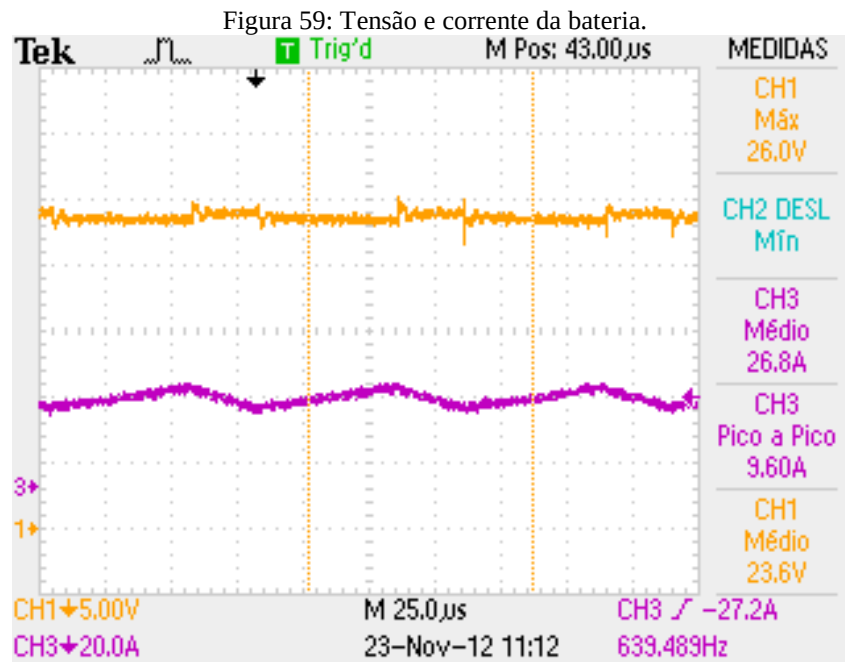


Fonte: Produção do próprio autor.



Fonte: Produção do próprio autor.

A tensão da bateria e a corrente da bateria estão apresentadas na Figura 59. Pode-se verificar que a ondulação de tensão da bateria é muito reduzida. Quando é drenada energia da bateria observa-se uma leve queda na tensão, porém, com o auxílio dos capacitores do filtro de saída esta ondulação pode ser desprezada.

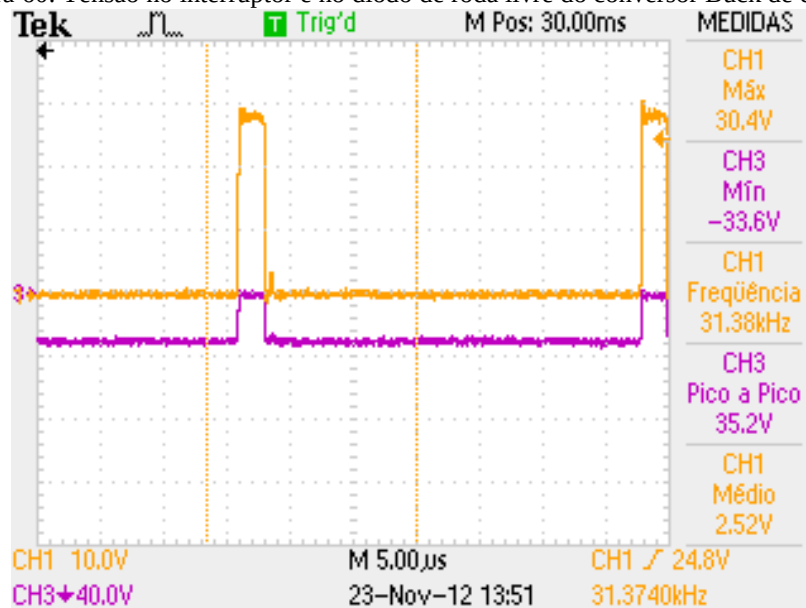


Fonte: Produção do próprio autor.

8.2 CONVERSOR BUCK DE ENTRADA

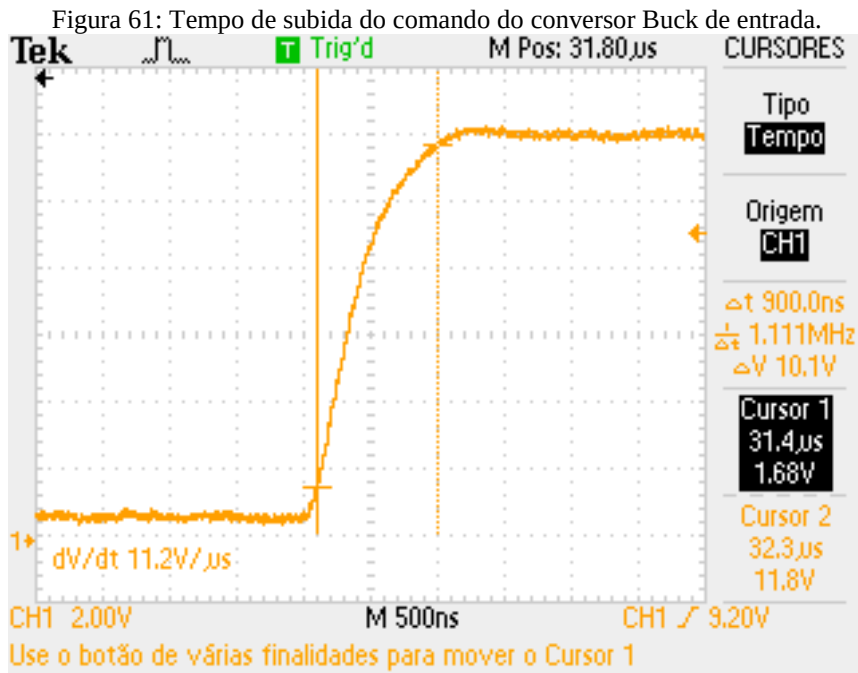
Pode-se verificar a tensão no interruptor (traçado escuro) e no diodo de roda livre (traçado claro) do conversor Buck de entrada na Figura 60.

Figura 60: Tensão no interruptor e no diodo de roda livre do conversor Buck de entrada.

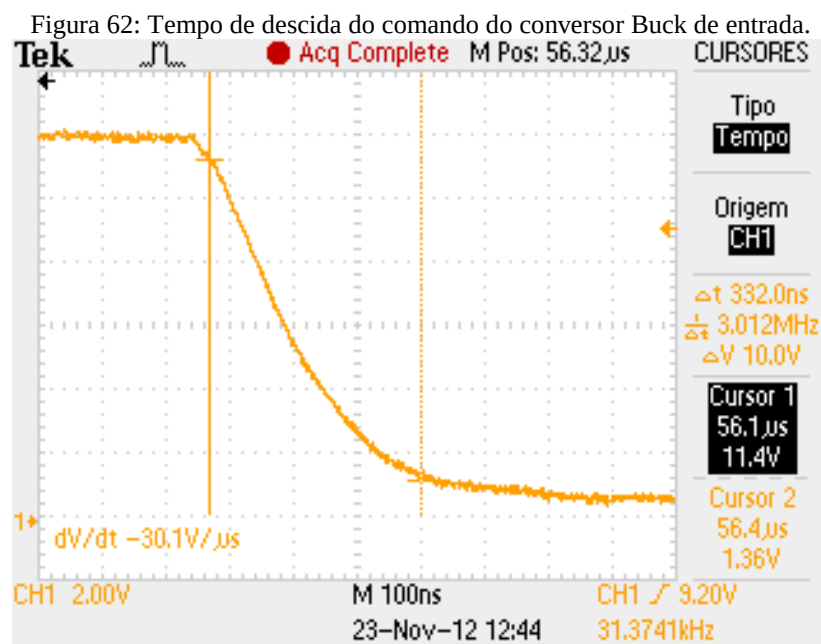


Fonte: Produção do próprio autor.

A razão cíclica é elevada, devido à proximidade da tensão de máxima potência dos painéis e a tensão das baterias. Pode-se verificar a forma de onda do comando dos interruptores a seguir. A Figura 61 apresenta a subida do comando e a Figura 62 a descida. Os tempos de comutação novamente estão superiores aos utilizados nos cálculos de perdas, podendo resultar em perdas maiores que as previstas.

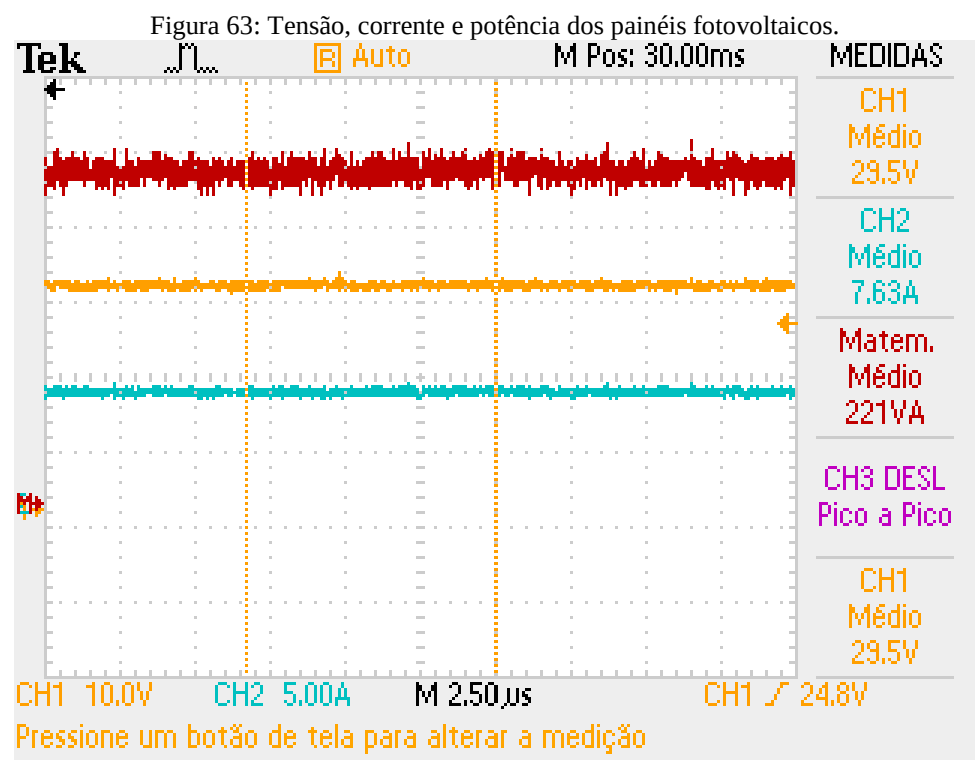


Fonte: Produção do próprio autor.



Fonte: Produção do próprio autor.

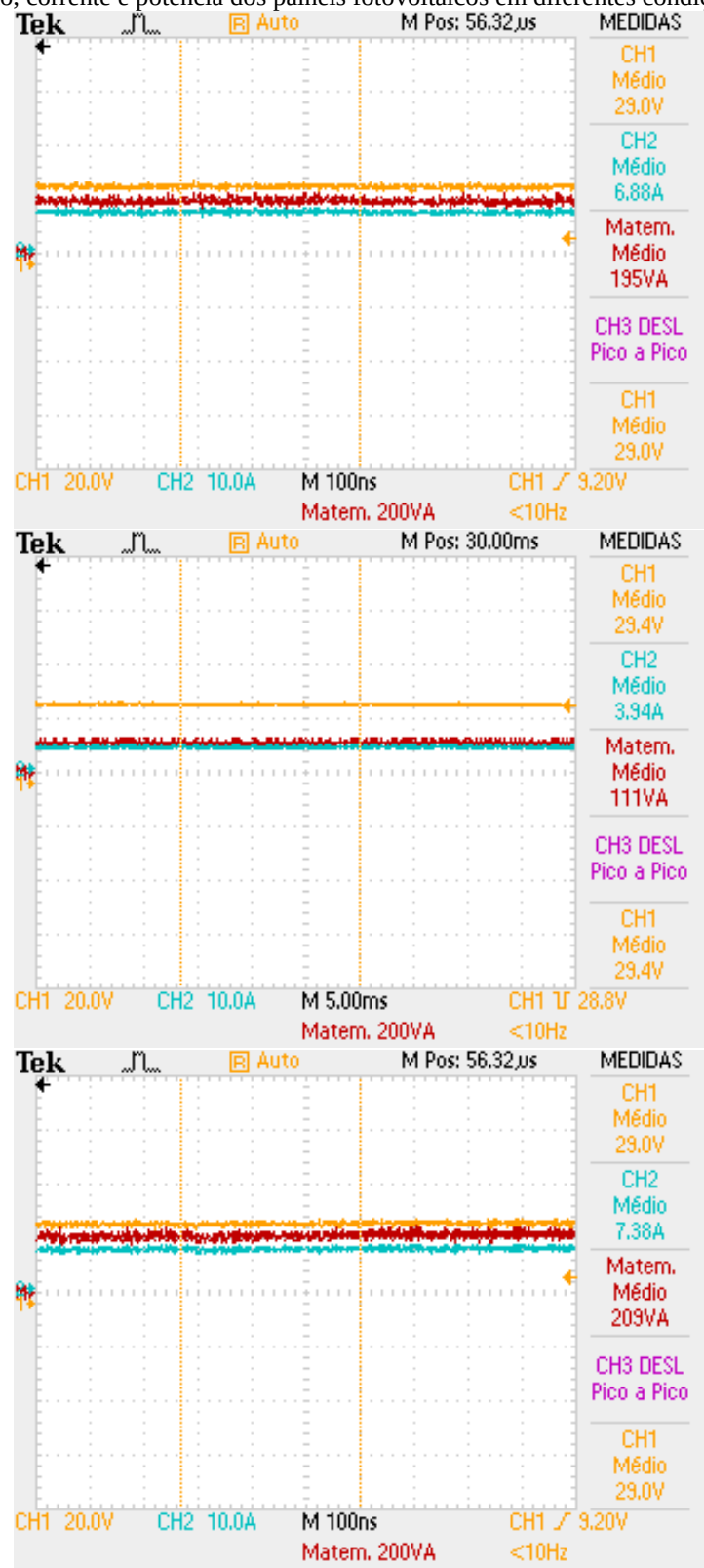
Pode-se verificar a validação do método de rastreamento da máxima potência dos painéis fotovoltaicos na Figura 63. Observa-se que no instante da medição o conversor absorvia 221 W de potência dos painéis.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores obtidos variam constantemente de acordo com a variação da irradiação solar e da temperatura dos painéis. Foram retiradas várias medições da potência do painel em diferentes condições conforme Figura 64 e observou-se que o controle do MPPT acompanhava as variações na irradiação solar. Foram realizados sombreamentos propositalis para verificar se o MPPT agia rapidamente, e foi possível observar que imediatamente após o sombreamento a potência se estabiliza.

Figura 64: Tensão, corrente e potência dos painéis fotovoltaicos em diferentes condições de irradiação.



Fonte: Produção do próprio autor.

9 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizada a análise completa do sistema elétrico instalado na embarcação da equipe Barco Solar UDESC e foi realizada uma melhora, aproveitando os pontos fortes e procurando melhorar os pontos fracos. Foi feita uma abordagem teórica do funcionamento dos conversores, levando em conta alguns fatores determinantes para facilitar a montagem e aumentar a confiabilidade do sistema instalado.

O conversor projetado e construído teve seu funcionamento de acordo com o esperado e com os resultados simulados. A análise de perdas na potência nominal foi inviável, visto que o barco não ficou pronto a tempo de instalar os painéis e o motor para se realizar os testes. Os testes de eficiência do conversor Buck de saída foram comprometidos pela descarga da bateria, sendo necessário utilizar todos os painéis fotovoltaicos para fornecer energia à bateria e não descarrega-las. Além disso, é necessária a realização dos testes em dias com longos períodos ensolarados.

Porém, o funcionamento do conversor foi validado utilizando cargas RL para simular o motor e instalando painéis solares para verificar o funcionamento do MPPT. Com o passar dos dias e com a finalização da construção do barco, testes poderão ser realizados com a potência nominal dos conversores. Através de testes mais longos, devem ser apontados pontos críticos que comprometam a confiabilidade do conversor.

Em trabalhos futuros devem ser realizados mais testes de eficiência buscando pontos críticos no sistema e procurando melhorá-los, bem como a instalação e testes do sistema na embarcação.

A realização deste projeto acrescentou enorme conhecimento prático e teórico durante o dimensionamento, montagem e no teste de conversores.

10 REFERÊNCIAS

- AVAGO. www.avagotech.com. **Avago Technologies**, 2007. Disponível em: <<http://www.avagotech.com/docs/AV01-0557EN>>. Acesso em: 04 Dezembro 2012.
- BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas**. Edição do Autor. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.
- BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Conversores CC-CC Básico Não Isolados**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2000.
- CHAPMAN, P. L.; ESRAM, T. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, Junho 2007. 439-449.
- DACOL, R. P. **Resumo das Atividades de Iniciação Científica - Processamento Eletrônico de Energia Fotovoltaica**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2012.
- ELECTRICMOTORSPORT. Electric Motor Sport. **Electric Motor Sport**, 2012. Disponível em: <http://www.electricmotorsport.com/store/ems_ev_parts_motors_me0909.php>. Acesso em: 12 Dezembro 2012.
- FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. MPPT techniques for PV Systems: energetic and cost comparison. **IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conersion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, p. 1-6, 2008.
- FEMIA, N. et al. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. **IEEE Transactions on power Electronics**, v. 20, Julho 2005.
- GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 36). **Wiley InterScience**, 2010. Disponível em: <www.interscience.wiley.com>. Acesso em: 15 Abril 2012.
- GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Rio de Janeiro. 1999.
- HART, G. W.; BRANZ, H. M.; COX, C. H. Experimental tests of open-loop maximum-power-point tracking techniques. In: _____ **Solar Cells**. [S.l.]: [s.n.], v. 13, 1984. p. 185-195.
- HECKTHEUER, L. A. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

IRF. International Rectifier. **International Rectifier**, 2006. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/mbr6045wt.pdf>>. Acesso em: 10 Dezembro 2012.

IRF. International Rectifier. **International Rectifier**, 2006. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/IRFS3207.pdf>>. Acesso em: 10 Dezembro 2012.

JIANG, J.-A. et al. Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power. **Tamkang Journal of Science and Engineering**, Taiwan, v. 8, p. 147-153, 2005.

KYOCERA. www.kyocerasolar.com.br. **Kyocera Solar**, 2007. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/site/arquivos/produtos/76.pdf>>. Acesso em: 04 Dezembro 2012.

LACERDA, V. S. **Sistema Monofásico de Aproveitamento Fotovoltaico Caracterizado por baixa distorção harmônica injetada na Rede e Rastreamento de Máxima Potência**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2010.

MARTINS, D. C.; COELHO, R. F.; DOS SANTOS, W. M. **Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos: Revisão e Novas Propostas**. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência. Natal. 2011.

MOLINA, M. G.; PONTRORIERO, D. H.; MERCADO, P. E. AN EFFICIENT MAXIMUM-POWER-POINT-TRACKING CONTROLLER. **Eletrônica de Potência**, v. 12, Julho 2007.

STEIN, F. G. **Conversão de Energia Solar Fotovoltaica com Rastreamento de Máxima Potência Aplicado ao Conversor Boost**. UDESC. Joinville, p. 78. 2012.