

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA

ARION DIAS FARAGO

**APLICAÇÃO DE UM CONVERSOR CÚK NO APROVEITAMENTO DA
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM APLICAÇÕES REMOTAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2016

ARION DIAS FARAGO

**APLICAÇÃO DE UM CONVERSOR CÚK NO APROVEITAMENTO DA
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM APLICAÇÕES REMOTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Márcio Mendes Casaro

PONTA GROSSA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional



TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DE UM CONVERSOR CÚK NO APROVEITAMENTO DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA EM APLICAÇÕES REMOTAS

por

ARION DIAS FARAGO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 22 de Fevereiro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Márcio Mendes Casaro, Dr. Sc.
Prof. Orientador

Edison Luiz Salgado Silva, Ms. Sc.
Membro titular

Julio Cesar Guimarães, Ms. Sc.
Membro titular

Alexandre Junior Fenato, Ms. Sc.
Responsável pelos Trabalhos
de Conclusão de Curso

Jeferson José Gomes, Ms. Sc.
Coordenador de Curso
UTFPR - Campus Ponta Grossa

RESUMO

Este trabalho propõe a aplicação de um conversor Cúk no aproveitamento da energia solar fotovoltaica em aplicações remotas. Parte da aplicação remete ao armazenamento da energia proveniente de um painel fotovoltaico em uma bateria para que esta possa suprir uma carga remota. O trabalho propõe o estudo, projeto, simulação e implementação de um conversor de potência CC-CC para processamento de energia elétrica. São apresentados conceitos relacionados à geração de energia solar fotovoltaica como fonte alternativa e renovável, estudo de topologias de conversores CC-CC, técnicas de MPPT, equacionamento matemático do Cúk para obtenção de seus parâmetros, projeto físico do conversor, simulações, projeto dos indutores, layout da placa, circuito de comando, testes em laboratório bem como teste do sistema completo realizado no Campus UTFPR Ponta Grossa.

Palavras chave: Conversor Cúk. Energia Solar Fotovoltaica. Bateria em Aplicações Remotas. Energia Renovável. Conversores CC-CC.

ABSTRACT

This final assignment proposes the application of a Cúk converter to apply photovoltaic solar energy in remote applications. Part of the application refers to the energy storage that comes from a photovoltaic panel in a battery in order that it can supply a remote charge. This work proposes the study, project, simulation and implementation of a CC-CC power converter for energy processing. Concepts are shown related to photovoltaic solar energy generation as alternative and renewable source, study of CC-CC converters topologies, MPPT techniques, Cúk mathematical equating for the parameters obtainment, physical project of the converter, simulations, inductors project, board layout, command circuit, laboratory tests as well as test in the whole system done in the UTFPR Ponta Grossa Campus.

Keywords: Cúk Converter. Photovoltaic Solar Energy. Battery in Remote Applications. Renewable Energy. CC-CC Converters.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica (OIEE)
- Figura 2 - Demanda de energia elétrica – projeção do consumo 2005-2030
- Figura 3 - Radiação global diária – média anual típica
- Figura 4 - Painel solar típico de 250W - Kyocera (dim: 1662 x 990 x 46 mm)
- Figura 5 - Eficiência de painéis solares
- Figura 6 - Esquema de um sistema conectado à rede (grid-tie)
- Figura 7 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar
- Figura 8 - Equacionamento do circuito elétrico equivalente de uma célula solar
- Figura 9 - Curva corrente/tensão para valores r_p e r_s
- Figura 10 - Avaliação do fator de rastreamento de um painel fotovoltaico utilizando os principais métodos para o MPPT, desconsiderando sombreamento
- Figura 11 - Topologia com apenas um conversor para uso de múltiplos PVs (*multi strings*)
- Figura 12 - Configuração em string para conversores solares
- Figura 13 - Conversor *Boost* clássico
- Figura 14 - Esquema da atuação da razão cíclica (D) no conversor
- Figura 15 - Ganho estático do conversor *Boost* em função da razão cíclica
- Figura 16 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor *Buck*
- Figura 17 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor *Buck*
- Figura 18 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor *Buck-Boost*
- Figura 19 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor *Buck-Boost*
- Figura 20 - Conversor CC *Cúk*
- Figura 21 - Circuito *Cúk* com chave fechada
- Figura 22 - Circuito *Cúk* com chave aberta
- Figura 23 - Circuito de potência real do conversor *Cúk*
- Figura 24 - Formas de onda para regime permanente (*Cúk*)
- Figura 25 - Estação meteorológica GRWS100 *Campbell Scientific*
- Figura 26 - Estrutura do sistema
- Figura 27 - Curva I-V painel *SOLAREX IMSX70*
- Figura 28 - Esquemático do conversor *Cúk* para simulações no PSIM®
- Figura 29 - Corrente de entrada $I(L1)$, corrente de saída $I(L2)$ e pulso de controle (V_g)
- Figura 30 - Valores de correntes (simulação)
- Figura 31 - Tensão sob o capacitor (V_S - V_D) e pulso de controle (V_g)

Figura 32 - Valores de tensão (simulação)

Figura 33 - Esquemático do conversor Cúk com indutores acoplados

Figura 34 - Valores de correntes com indutores acoplados (simulação)

Figura 35 - Cúk com indutores acoplados magneticamente

Figura 36 - Esquemático do circuito desenhado no software *DesignSpark*

Figura 37 - Circuito impresso no software *DesignSpark*

Figura 38 - Pinagem e funções do CI SG3524

Figura 39 - Circuito de comando

Figura 40 - Circuito de comando finalizado em *protoboard*

Figura 41 - Especificações técnicas do PV utilizado no projeto

Figura 42 - Sinal do circuito de comando

Figura 43 - Tensão no transistor

Figura 44 - Teste do circuito de comando e do conversor conectado à uma carga

Figura 45 - Teste para verificação dos pontos dos indutores acoplados

Figura 46 - Corrente de saída (I_{out})

Figura 47 - Ondulação da corrente de saída (I_{out})

Figura 48 - Tensão no capacitor

Figura 49 - Ondulação da tensão no capacitor

Figura 50 - Tensão no transistor

Figura 51 - Corrente na entrada (I_{in})

Figura 52 - Ondulação da corrente na entrada (I_{in})

Figura 53 - Tensão na entrada (terminais do painel fotovoltaico)

Figura 54 - Tensão no diodo

Figura 55 - Potência máxima de saída

Figura 56 - Potência máxima de entrada

Figura 57 - Testes do sistema completo (1)

Figura 58 - Testes do sistema completo (2)

LISTA DE ABREVIATURAS

BT - Baixa tensão
CA - Corrente alternada
CC - Corrente contínua
DDP - Diferencial de potencial
GD - Geração distribuída
I_{ph} - Fotocorrente
I_r - Corrente de saturação reversa da célula
R_p - Resistência paralela da célula
R_s - Resistência série
V_{ef} - Tensão eficaz
V_g - Tensão pulso de controle

LISTA DE SÍMBOLOS

C - Capacitor
D - Diodo
D - Razão cíclica
d - diâmetro
E - Fonte
f - Frequência
G - Ganho estático do conversor
G - Terminal Gate (transistor)
I - Corrente
K - Constante de *Boltzmann*
L - Indutor
N - Número de espiras
P - Potência
q - Carga do elétron
R - Resistência (carga)
S - Interruptor (transistor)
T - Temperatura ambiente, k.
V - Tensão
V_o - Tensão de saída
η - Fator de qualidade da junção p-n
η - Rendimento
Δ - Variação / Ondulação

LISTA DE SIGLAS

PWM - *Pulse width modulation*
PV - Painel fotovoltaico (*photovoltaic*)
MPP - Maximum Power Point
MPPT - Maximum Power Point Tracking
MCC - Modo de condução contínua

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. PROBLEMA	17
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3. JUSTIFICATIVA	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. ENERGIA SOLAR	19
2.2. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO	20
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	21
2.4. PARÂMETROS DO PAINEL FOTOVOLTAICO	22
2.4.1. RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – MPPT	24
2.5. ESTÁGIOS DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS	25
2.5.1. ESTÁGIOS ELEVADORES.....	25
2.5.2. CONVERSOR CC-CC BOOST CLÁSSICO	27
2.5.3. CONVERSOR <i>BUCK</i>	30
2.5.4. CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i>	31
2.5.5. CONVERSOR <i>CÚK</i>	33
2.6. BATERIAS E CARREGADORES.....	37
2.6.1. BATERIAS.....	37
2.6.2. TENSÃO DE FLUTUAÇÃO E DE CARGA	37
2.6.3. CAPACIDADE E UTILIZAÇÃO.....	38
2.6.4. CARREGADORES	38
3. SISTEMA IMPLEMENTADO	40
4. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO CONVERSOR CÚK	44
5. PROJETO DO CONVERSOR	47
6.SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS REALIZADOS VIA SOFTWARE	48
7. PROJETO, TESTES E RESULTADOS PRÁTICOS	52
7.1. PROJETO INDUTORES	52
7.2. PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....	54
7.3. CIRCUITO DE COMANDO	55
7.4. LISTA DE MATERIAIS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES	57
7.5. TESTES DO CONVERSOR E CIRCUITO DE COMANDO (BANCADA LABORATÓRIO)	58
7.6. TESTES REALIZADOS DO SISTEMA COMPLETO (PV + CONVERSOR + BATERIA/CARGA)	60

7.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
8. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

Geração de energia elétrica é um assunto de suma importância que tem sido tratado com maior ênfase em escala global. Devido ao grande crescimento científico e tecnológico, ou até mesmo por questões populacionais e estruturais que os países estão tendo, faz-se necessário cada vez mais o uso de fontes alternativas e renováveis de energia que possam atender a demanda energética atual, de forma a não prejudicar o meio ambiente.

O desenvolvimento econômico e o nível de qualidade de vida de uma sociedade, dentre outros fatores, também pode ser medido pelo seu gasto energético, pois este mostra o quanto a energia elétrica tem sido utilizada em diferentes áreas. Um consumo energético alto no setor industrial, comercial e de serviços mostra um melhor desempenho nestes setores, ou seja, maior produção e demanda. Na área residencial, um maior gasto energético entende-se por um maior número de bens e serviços usados pela população, tendo estes uma maior tecnologia agregada (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2008). Energia pode ser então definida como fonte de desenvolvimento, sendo algo intrínseco ao aperfeiçoamento e evolução de uma sociedade ou nação.

Um maior uso de energia elétrica indica um maior desenvolvimento econômico de um país. Contudo, o grande uso da mesma contribui para o esgotamento das fontes não renováveis de energia, além do que várias das formas de geração de energia causam impactos ambientais. Portanto, a geração de energia elétrica é um tema de grande importância, necessitando estudo e planejamento na execução de um projeto energético.

A queima de combustíveis fósseis ainda é algo muito utilizado, causando grande poluição. No mundo, as fontes mais utilizadas para geração de energia são as usinas hidrelétricas, termelétricas, geotérmicas e nucleares. De acordo com a Resenha Energética Brasileira (2013) mostrada na Figura 1, o cenário brasileiro com relação ao uso de fontes renováveis é muito bom, chegando a 83,7%, sendo a maior parte, cerca de 70%, gerada a partir de hidrelétricas. A grande vantagem é que esta é uma fonte limpa de energia, porém, causa um enorme impacto ambiental em sua implantação. Além de alterar completamente o ecossistema, mudando a vegetação local e causando a

migração de certos animais, há também a questão social relacionada com habitação da população.

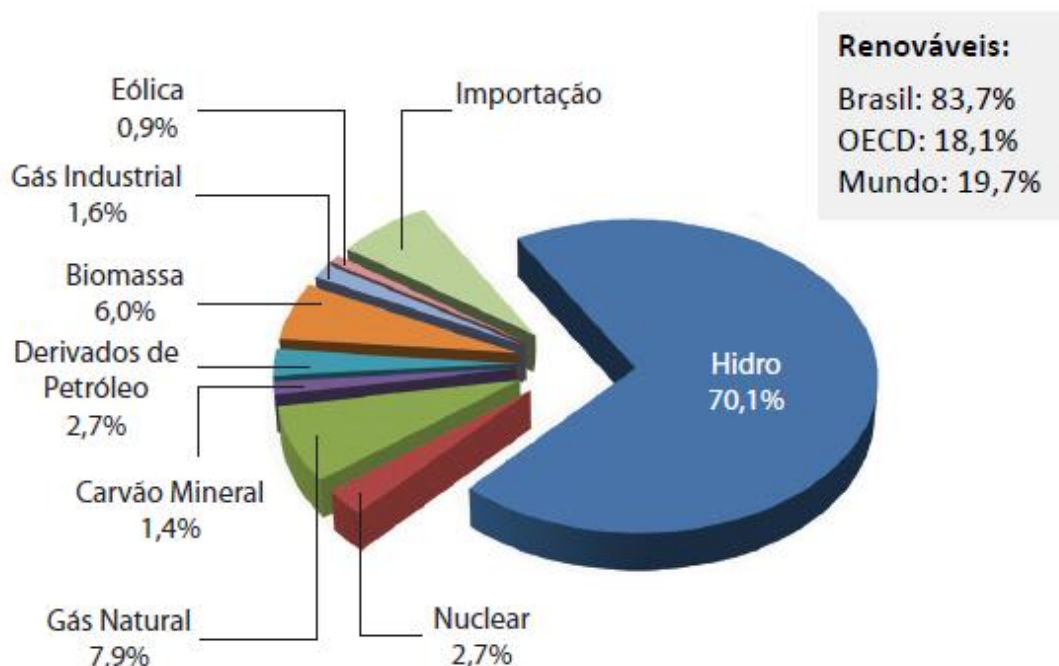


Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica (OIEE).
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2013)

Faz-se necessário diversificar a energia de maneira a não haver dependência de apenas um tipo de fonte de energia, que no caso do Brasil a maior parte é gerada por centrais hidrelétricas. Com relação a projeção do consumo brasileiro de 2005-2030 realizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e divulgado pelo Instituto Sul-Americano de Política e Estratégia - ISAPE (2011), este apresenta um consumo de 345,2 TWh em 2005 e de 934,9 TWh em 2030, conforme mostra a Figura 2. Isso é um indicador que representa um grande crescimento no país, tendo este a necessidade de aprimorar sua matriz energética buscando novas fontes de energia para corresponder a esta demanda. Observação: na Figura 2, o item "Auto produção" inclui aproveitamento de resíduos industriais e geração distribuída.

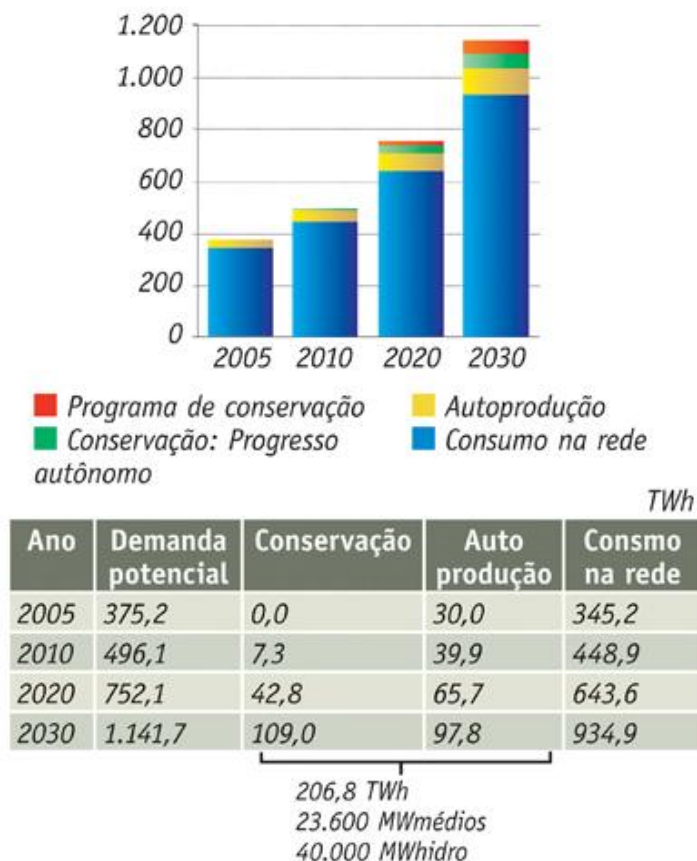


Figura 2 – Demanda de energia elétrica – projeção do consumo 2005-2030.
 Fonte: Instituto Sul- Americano de Política e Estratégia (ISAPE)

Neste contexto, este trabalho apresenta o estudo de uma alternativa para essa necessidade de diversificação da produção energética, apontando o uso da energia solar. A grande vantagem é que por ser inesgotável, renovável e limpa, não causa danos ao meio ambiente.

O Ministério do Meio Ambiente (2013) define que as aplicações relacionadas à energia solar podem ser classificadas em dois grupos: Energia Térmica e Solar Fotovoltaica. A primeira remete a coletores e concentradores na qual são usados para aquecimento de fluidos. O uso de coletores é algo vantajoso, uma vez que contribui pela substituição dos aquecedores típicos usados domesticamente: chuveiro elétrico e torneira elétrica. A finalidade dos concentradores é a mesma dos coletores, porém são usados quando a temperatura a ser atingida precisa ser maior. O segundo grupo faz uso da energia solar para realizar conversão em energia elétrica, através da utilização de Painéis Fotovoltaicos (PVs), sendo este o grupo a ser tema de estudo neste trabalho.

Com relação à utilização da energia solar, a Companhia Elétrica de Minas Gerais – CEMIG (2013) apresenta a idéia de que por ser uma fonte inesgotável, esta pode ser uma excelente solução de fornecimento de energia elétrica para áreas afastadas ou até mesmo sem energia podendo ser usada também por conjuntos habitacionais.

A energia fotovoltaica tende a ser uma boa opção para geração de energia na zona rural e em lugares remotos, como certas regiões no Norte e Nordeste do Brasil. São várias as aplicações, dentre elas: bombeamento de água, cerca elétrica, iluminação rural, sistemas de telecomunicações, sistemas de irrigação etc.

Para Walter Bodra (2011, p. 1), “O custo-benefício da tecnologia compensa, porque o sistema, além de ter vida útil longa, praticamente não exige manutenção específica. Mas não é apenas a questão financeira. Mais importante é que se trata de uma fonte de energia limpa, 100% responsável”. O especialista calcula que a economia de luz pode chegar em até 40% com o uso desta tecnologia.

O Brasil é um país muito propício para o uso de energia fotovoltaica, de forma a apresentar ótimos níveis de radiação solar. Devido ao posicionamento do país, estes níveis são altíssimos o ano todo. O Brasil compreende um posicionamento geográfico onde a incidência de raios solares é muito maior quando comparado com outras regiões do globo. Mesmo assim, certos países que não apresentam muita vantagem nesse quesito fazem grande uso da geração distribuída (GD) proveniente de painéis fotovoltaicos. Como exemplo disso, a Alemanha na qual possui níveis de incidência solar extremamente inferiores aos do Brasil, mas está entre os países desenvolvidos que mais fazem uso da energia solar. A região menos favorecida do Brasil possui 1,4 vezes mais radiação solar quando comparado com a região mais favorecida da Alemanha (SALAMONI; RUTHER, 2007). A Figura 3 abaixo mostra o mapa da irradiação solar no Brasil.

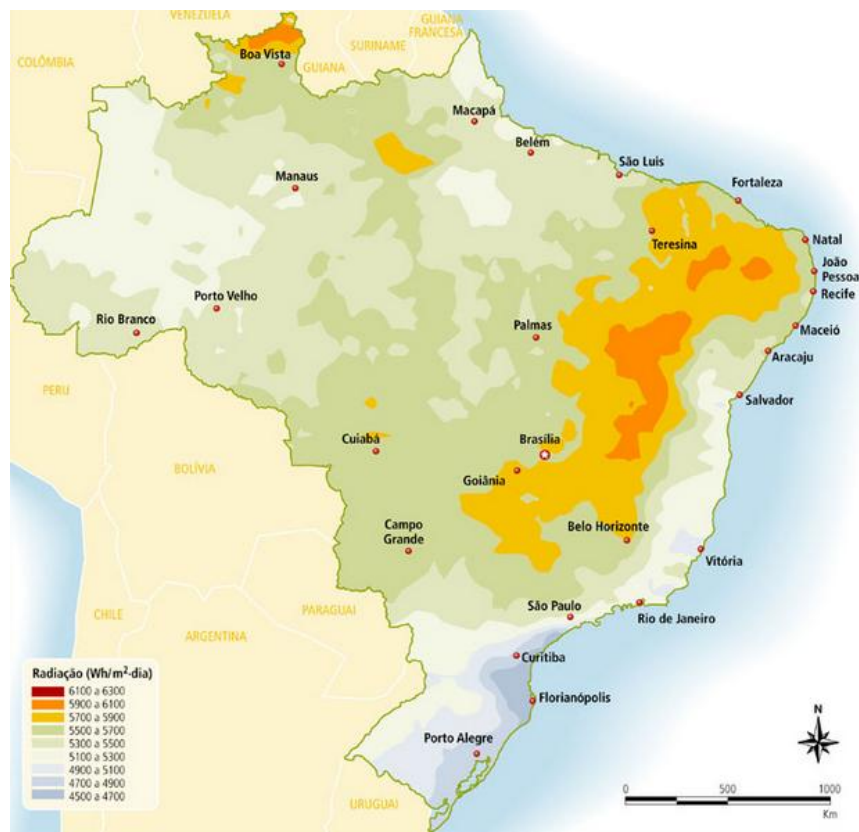


Figura 3 - Radiação global diária – média anual típica
 Fonte: Atlas de Irradiação Solar no Brasil. 1998. (Adaptado).

Dentre os vários países desenvolvidos na qual utilizam painéis fotovoltaicos, a Alemanha proporciona incentivo ao uso deste tipo de energia por parte dos consumidores. Sendo assim, há uma diminuição no consumo de energia elétrica em horários de pico, provenientes das concessionárias de energia. Isso traz grandes benefícios, pois alivia a parte de transmissão e geração. Quando a energia gerada excede a quantia que é usada pelo usuário, esta retorna a rede elétrica e o consumidor recebe da companhia de energia o excedente referente ao produzido pelos PVs (MARTINS; RÜTHER; ABREU, 2009 apud ALVES, 2013, p. 17).

Outro exemplo é o Canadá, onde o mercado de gerações de energia fotovoltaica residenciais tem crescido muito ultimamente pelo apoio dos governos locais e empresas de serviços públicos. Em 2009, *Ontario Power Authority* (OPA) lançou o programa de *Micro-feed-in Tariff (MicroFIT)* dando oportunidades para proprietários, agricultores e pequenos empresários para a implantação de micro projetos de geração de energia renovável (até 10 quilowatts). No programa *MicroFIT*, essas pessoas serão pagas por este tipo

de geração, e para uso desta tecnologia em telhados, recebem cerca de 80,2 centavos / kWh (ZONG, XIANGDONG, 2011).

No final de 2014, uma potência instalada de geração de energia solar fotovoltaica de 180 Gigawatts (GW) foi gerada globalmente, cerca de 40 GW a mais que em 2013. Países como Alemanha, China, Japão, Itália e EUA constituem cerca de 70% do total mundial de potência instalada, estando entre os cinco primeiros no mundo para o uso desta fonte. Estes países apresentam programas muito bem planejados e intensos no sentido de mudar a matriz energética local. Dados mostram que dentro de dois anos o Brasil poderá estar entre os 20 países com maior geração de energia solar no mundo (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

O crescimento da geração elétrica através de sistemas fotovoltaicos é um dos maiores no campo das energias renováveis, e a tendência é aumentar cada vez mais nos próximos anos e como consequência, um crescente número de novos dispositivos e componentes para PV, principalmente no que diz respeito a células e conversores de potência que estão sendo apresentados neste mercado (ELTAWIL, MOHAMED A; ZHAO, ZHENGMING, 2010).

Nos próximos anos deveremos ter redução nos custos de sistemas geradores fotovoltaicos, sejam por técnicas focando os cristalinos, estruturas e materiais que compõem o PV ou pesquisas de forma geral para melhorar os quesitos relacionados com essa tecnologia. A realidade é que os nichos de mercado vão crescer especialmente para poder suprir áreas remotas, mas a adoção em larga escala em curto prazo ainda será um tanto demorada (PATTERSON, DEAN J, 2009).

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia trabalha para a criação de projetos de aproveitamento da energia solar através de sistemas fotovoltaicos, focando a geração de energia para áreas remotas, rurais e ao próprio desenvolvimento da região. Estes projetos são usados para bombeamento de água, iluminação pública, fornecimento de energia para sistemas de uso coletivo tais como escolas, postos de saúde dentre outros, uso doméstico e telefonia, cercas elétricas e até mesmo produção de gelo e dessanilização de água (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

Neste contexto, observa-se que a tendência para o uso de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica é crescer cada vez mais com o

passar dos anos. O Brasil é um país com um potencial ideal para a implantação dessa tecnologia, mas ainda encontra-se muito defasado quando comparado a outros países. Contudo, devido ao grande crescimento mundial relacionado a este tipo de energia como mostrado anteriormente, juntamente com a conscientização e programas de incentivo, e até mesmo pela necessidade de realizar um planejamento e mudança na matriz energética brasileira, naturalmente o uso desta energia aumentará no país, começando pelos grandes centros urbanos.

Tendo em vista a grande importância do estudo neste tema, este trabalho apresentará o estudo, projeto e implementação de um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica, a ser utilizado em aplicações remotas.

1.1. PROBLEMA

Como armazenar a energia proveniente de um painel fotovoltaico em uma bateria a fim de que esta possa suprir a demanda de um sistema remoto?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa o estudo, projeto, simulação e implementação de um conversor de potência CC-CC para processamento da energia elétrica proveniente de um painel fotovoltaico, a ser aplicada na alimentação de cargas elétricas remotas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar os conceitos relacionados à geração de energia solar fotovoltaica;
- Estudar as recomendações e conceitos referentes aos sistemas de geração de energia utilizando fontes alternativas e renováveis;
- Estudar topologias de conversores CC-CC para aplicação em sistemas fotovoltaicos;
- Estudar técnicas de rastreamento da máxima potência a ser obtida dos painéis fotovoltaicos;
- Selecionar e projetar a estrutura de potência do conversor CC-CC;
- Realizar o equacionamento matemático do conversor CC-CC para obtenção dos parâmetros e dos esforços a que cada componente será submetido;
- Realizar simulações computacionais do sistema completo;
- Implementar o protótipo e realizar ensaios do conversor;
- Realizar ensaios do sistema completo.

1.3. JUSTIFICATIVA

A utilização de sistemas solares para geração de energia elétrica apresenta inúmeras vantagens, por ser considerada uma fonte limpa, renovável e inesgotável de energia. Fazer uso de geração de energia elétrica através de PVs é uma alternativa para reduzir a geração de energia elétrica através dos meios mais utilizados atualmente, tal como as hidrelétricas. Além disso, esta alternativa pode auxiliar na redução dos picos de tensão nos horários de maior utilização da rede elétrica de distribuição, bem como contribuir na demanda energética, sendo uma excelente alternativa para atender áreas remotas, rurais ou de difícil acesso. O fator manutenção também é um benefício, pois é praticamente livre desta atividade, sendo um sistema de alta durabilidade.

A questão ambiental é um assunto de grande importância e muito discutido nos dias atuais. A utilização de sistemas fotovoltaicos para geração de energia traz grandes benefícios para a sociedade, por ser uma energia que possui sustentabilidade, tema muito discutido no âmbito mundial.

O presente trabalho propõe o estudo e implementação de um sistema de geração de energia elétrica utilizando sistemas fotovoltaicos, sendo este um tema de grandes pesquisas relacionada a acessibilidade de seu uso. O Brasil é um país extremamente indicado para o uso desta tecnologia no quesito nível de radiação, sendo este um tema promissor tanto economicamente quanto ambientalmente.

A aplicação da eletrônica de potência, através da utilização de conversores de potência, contribui no processamento, conversão e tratamento da energia, trazendo mecanismos cada vez mais eficientes no ponto de vista de qualidade de energia entregue. Desta forma, justifica-se a escolha deste tema tão atual, sendo a razão do estudo deste trabalho os motivos do mesmo possuir relevância social, política e ambiental, contribuindo de forma prática para um uso diversificado de tecnologias de geração de energia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA SOLAR

Quando a energia solar passa pela atmosfera do planeta, esta se apresenta entre duas condições: raios infravermelhos e raios ultravioletas. Essa forma de luz visível pode ser coletada e usada como energia térmica ou elétrica. Anteriormente foram comentados alguns sistemas térmicos, contudo o estudo deste trabalho é focado no uso de energia solar em energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos.

Um material semicondutor, usualmente o silício, ao receber estímulos provocados por radiação, gera um fluxo eletrônico entre as partículas positivas e negativas. As células possuem no mínimo duas camadas de material semicondutor na qual uma está carregada positivamente e a outra carregada negativamente. Quando essa junção eletrônica recebe radiação, o campo elétrico gera um fluxo eletrônico. Com este fluxo, há a geração de corrente contínua (CC). Em sistemas PV a conversão de energia solar em elétrica é direta sendo que quanto maior a incidência solar, maior a movimentação das partículas no material, ou seja, maior fluxo eletrônico. O sistema não precisa do brilho solar em sua operação, podendo gerar eletricidade em dias nublados também (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013).

Os fótons da luz solar são absorvidos pela célula ocorrendo o efeito fotovoltaico. Daí o nome de painéis fotovoltaicos (PV), do inglês *Photovoltaic*. Os elétrons que se encontram na célula ganham energia proveniente dos fótons e passam a movimentar-se, gerando então corrente elétrica.

O painel fotovoltaico faz uso de luz solar, de forma a convertê-la em energia elétrica, sendo este efeito denominado fotoelétrico. Esta é vista como uma fonte limpa de energia e sem impactos ao meio ambiente durante seu período de operação, mesmo que ainda produza poluentes durante seu processo produtivo e que após a sua utilização, a reciclagem do painel não se de por completa (ALVES, 2013).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2013), há impactos ambientais na fase da produção dos módulos fotovoltaicos, sendo uma tecnologia intensiva em energia e também após a sua vida útil, cerca de 30

anos, quando o sistema é desligado e parte é reciclada e parte é destinada a um aterro sanitário.

Os efeitos relacionados com a energia solar são o termoelétrico e o fotovoltaico, de maneira que ambos aparecem em determinados tipos de materiais quando estes são expostos à radiação, sendo a grande maioria materiais semicondutores. No efeito termoelétrico, a energia pode ser convertida de térmica para elétrica ou da elétrica para a térmica, de maneira que quando aplicado uma diferença de temperatura em dois materiais de propriedades diferentes, eis que há um diferencial de potencial (ddp) na junção. Este é o Efeito *Seebeck*. O caso contrário também pode ocorrer, ou seja, aplicar uma ddp em dois materiais diferentes irá haver uma diferença de temperatura na junção, mais conhecido como efeito *Peltier* (ALVES, 2013). Com relação ao efeito fotovoltaico, este faz gerar energia elétrica quando ocorre incidência de fótons em uma junção semicondutora PN.

2.2. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO



Figura 4 - Painel solar típico de 250W desenvolvido pela Kyocera (Dim: 1662 x 990 x 46 m m)
Fonte: Kyocera do Brasil (2013)

A energia elétrica proveniente de um painel fotovoltaico é em corrente contínua (CC) geralmente com tensão variando de 12 a 68V e potências variando de 40 a 250W em geração distribuída.

Para aplicações onde deseja-se energia assim como da rede elétrica ou devolver a energia obtida por PVs para a rede elétrica, há todo um processo de conversão de energia. Primeiramente a energia encontra-se em baixa tensão

(BT) e precisa passar por um estágio antes de ser lançada na rede elétrica usual que está em corrente alternada (CA). Sendo assim, o primeiro passo seria elevar a tensão da energia gerada pelo PV e então fazer a conversão para corrente alternada. Desta forma, a energia está com os mesmos parâmetros que a energia da rede.

Todos esses estágios e processos causam perdas no sistema e por consequência, diminuindo sua capacidade e rendimento. Os painéis atuais ainda apresentam um baixo rendimento relacionado a esta conversão de energia, trazendo um grande desafio a ser superado pela comunidade científica. A Figura 5 mostra alguns exemplos de diferentes materiais usados em células e suas respectivas eficiências. Após todo o tratamento da energia, o rendimento precisa ser alto para haver um bom aproveitamento da energia gerada e que o usuário consiga compensar seu investimento com o tempo.

Tipo de célula	Eficiência (%)	Fabricante
Si (<i>crystalline</i>)	22.9 ±0.6	UNSW/Gochermann
Si (<i>large crystalline</i>)	21.4 ±0.6	SunPower
Si (<i>multicrystalline</i>)	17.55 ±0.5	Schott Solar
Si (<i>thin-film polycrystalline</i>)	8.2 ±0.2	Pacific Solar

Figura 5 – Eficiência de painéis solares
Fonte: Alves (2013)

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A classificação dos sistemas fotovoltaicos se faz por duas categorias: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*grid-tie*). Sistemas isolados não são conectados com a rede e como o próprio nome refere-se, são aplicados em lugares remotos ou em lugares onde o custo de acesso a rede elétrica é alto. Há a necessidade de fazer uso de baterias para armazenar essa energia gerada. Sistemas conectados à rede (*grid-tie*) funcionam como uma fonte de energia além de devolver o excedente na rede, não havendo necessidade de armazenamento (NEOSOLAR ENERGIA, 2013).

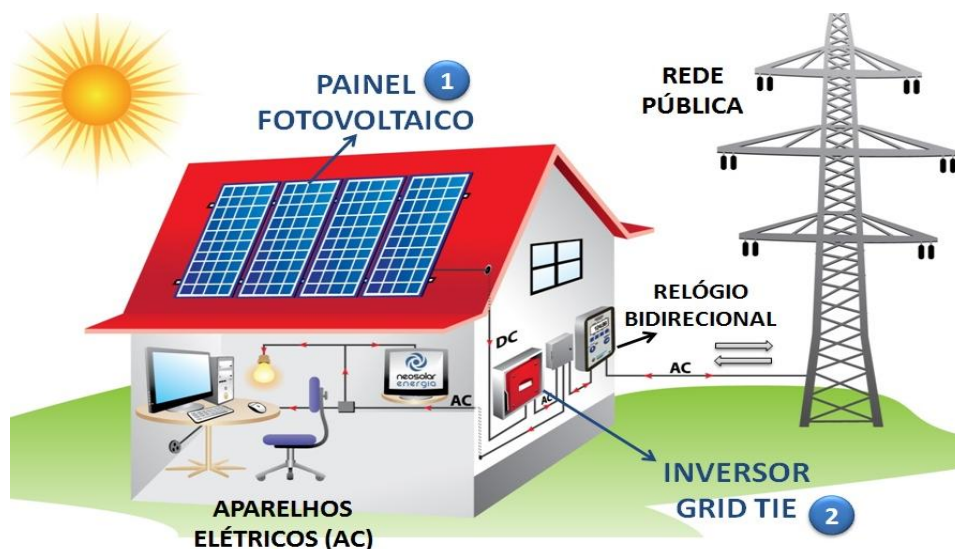


Figura 6 – Esquema de um sistema conectado à rede (grid-tie)
Fonte: Neosolar Energia (2013)

2.4. PARÂMETROS DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O funcionamento de um PV pode ser estudado de forma análoga a um circuito elétrico, sendo este representado na Figura 7 juntamente com o seu respectivo equacionamento da Figura 8 (SAMPAIO, 2010).

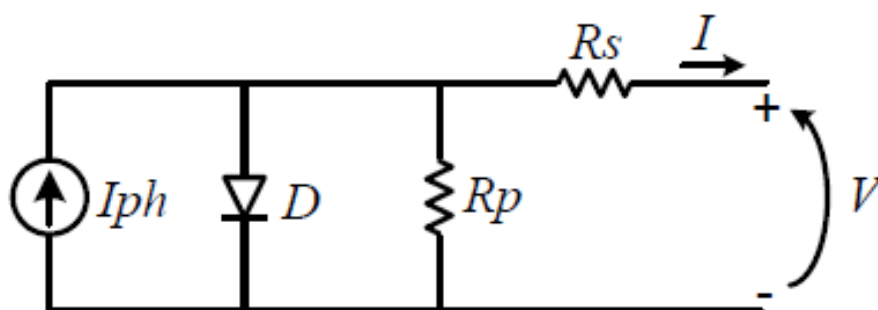


Figura 7 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.
Fonte: Sampaio (2010)

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[e^{q \cdot (V + I \cdot R_s) / \eta \cdot k \cdot T} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Figura 8 - Equacionamento do circuito elétrico equivalente de uma célula solar.
Fonte: Sampaio (2010)

V, I – Tensão e corrente nos terminais de saída da célula solar;

I_{ph} – Fotocorrente;

I_r – Corrente de saturação reversa da célula;

- R_s , R_p – Resistência série e paralela da célula;
 q – Carga do elétron, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C;
 η - Fator de qualidade da junção p-n;
 K – Constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;
 T – Temperatura ambiente, K.

As variáveis I_{ph} e I_r dependem da corrente e temperatura de curto circuito por célula juntamente com a temperatura de referência, dependendo também do grau de incidência solar, energia de banda proibida e tensão de circuito aberto.

A Figura 9 mostra a curva característica de tensão e corrente do PV sendo adquirida a partir do equacionamento da Figura 8. A curva depende de R_s e R_p , temperatura e incidência solar. Pode-se observar na Figura 9 que há um valor máximo relacionando corrente e tensão (I e V).

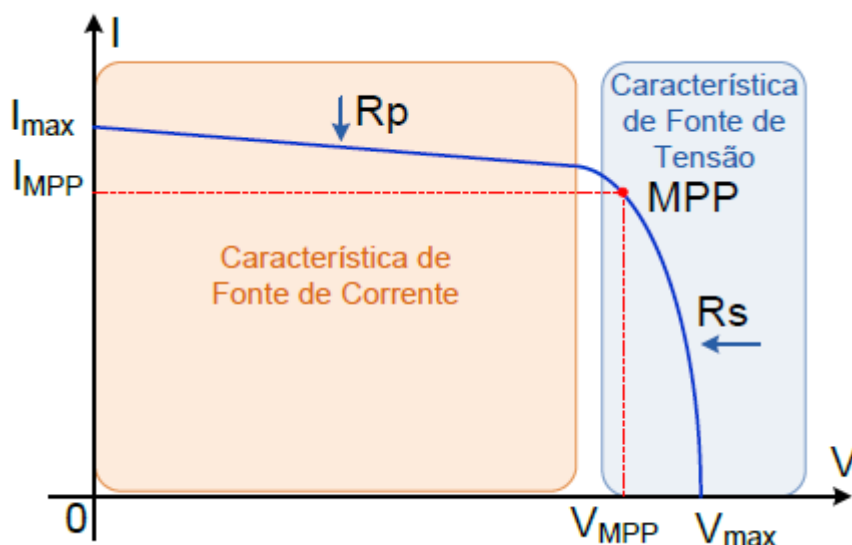


Figura 9 - Curva corrente / tensão para valores R_p e R_s .
 Fonte: Sampaio (2010)

Este ponto na qual relaciona a máxima potência extraída do painel é conhecido por MPP (Maximum Power Point) estando este em função de certos parâmetros do PV. Pode-se observar que a inclinação da curva depois do ponto de máxima potência é função da resistência série da célula. Neste intervalo o PV trabalha como fonte de tensão. De maneira análoga, o grau de inclinação antes do MPP é função da resistência paralela da célula, onde o PV

atua como fonte de corrente. Para obter um bom funcionamento do PV, se faz necessário estabelecer a corrente que será usada ou drenada do painel em função de seus parâmetros. Para tanto, é de grande importância e utilidade a técnica de MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou seja, seguidor do ponto de máxima potência. Como alternativa operacional, fixa-se a tensão de saída do seguidor do MPPT, sendo esta técnica implementada via hardware, tanto analógicos quanto digitais ou até pela utilização de softwares (SAMPAIO, 2010).

Durante o dia, observa-se que a curva do PV sofre mudanças devido ao grau de incidência solar, temperatura, variáveis inerentes à construção do painel, etc. Para extrair a máxima potência do painel usam-se algumas técnicas. O MPPT pode ser feito com o uso de controladores PID (proporcional-integral-derivativo).

2.4.1. RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – MPPT

Através do MPPT, é feito com que haja a maior potência possível retirada do PV tendo uma máxima eficiência de operação e ajudando a contribuir no investimento realizado. Devido a condições climáticas, fatores como temperatura e incidência solar mudam durante o dia, fazendo com que o MPPT seja algo difícil para o conversor e conseqüentemente para o sistema de controle. Em razão disso, tensão e corrente no PV possuem característica não linear.

O Maximum Power Point Tracker (Rastreador do ponto de máxima potência) é um dos circuitos associados a conversores que continuamente ajusta o ponto de operação CC para obtenção de maior potência disponível das células fotovoltaicas a qualquer instante (ELTAWIL, MOHAMED A; ZHAO, ZHENGMING, 2010). A Figura 10 mostra um comparativo entre os métodos usados para rastreamento. O ângulo de inclinação igual ao da latitude do local onde será instalado o PV geralmente é o melhor ângulo para se obter a máxima potência. No Brasil, a posição ideal do PV é para o norte, pois o sol nasce no leste, sobe se inclinando ao norte e se põe no oeste (PORTAL SOLAR, 2016).

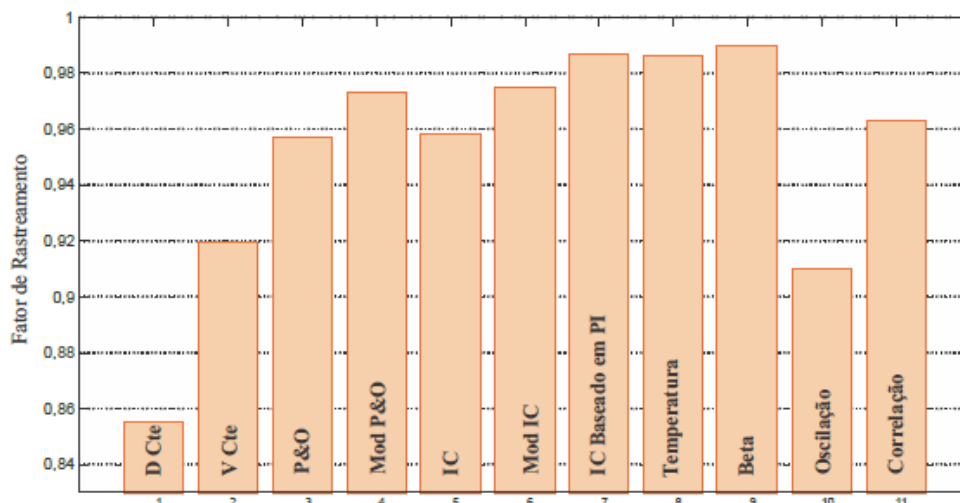


Figura 10 – Avaliação do fator de rastreamento de um painel fotovoltaico utilizando os principais métodos para o MPPT, desconsiderando sombreamento.

Fonte: Brito (2013)

Os principais métodos usados para rastrear o ponto de máxima potência em PV's de acordo com a Figura 10 são: Razão cíclica constante (*D Cte*), Tensão constante (*V Cte*), Método da perturbação e observação (*P&O*) e Método da perturbação e observação modificado (*Mod P&O*), Condutância incremental (*IC*) e Condutância incremental modificada (*Mod IC*), *IC* com controlador Proporcional-Integral (*IC baseado em PI*), Temperatura do painel (*Temperatura*), Método Beta (*Beta*), Método da Oscilação (*Oscilação*), Método da Correlação de Ripple (*Correlação*). As técnicas possuem diferenças, sendo aplicadas de acordo com o perfil de aplicação.

2.5. ESTÁGIOS DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS

2.5.1. ESTÁGIOS ELEVADORES

Os níveis de tensão fornecidos por um PV usual estão entre valores de 12 a 68Vdc. A tensão necessária para estar de acordo com os níveis da rede elétrica devem ser 127 ou 220Vef. Em razão disso, uma das etapas dessa conversão de energia seria passar primeiramente por um estágio de elevação.

Dependendo da aplicação, para obter maior tensão de saída dos PVs e maior potência útil, pode-se fazer o uso de um maior número de PVs arranjados em série ou paralelo (*multi strings*) com o uso de apenas um conversor. São usados diodos nos ramos para não haver fluxo de potência

entre os mesmos, contudo, os diodos causam grande dissipação de potência. Como nesta configuração a técnica de MPPT é feita para todos os painéis, não há garantia que os PVs irão operar em sua máxima potência, trazendo prejuízos para o sistema. Uma vantagem é que por não precisar de uma etapa elevadora devido ao maior número de painéis associados, o inversor terá mais rendimento como consequência da maior potência processada no mesmo.

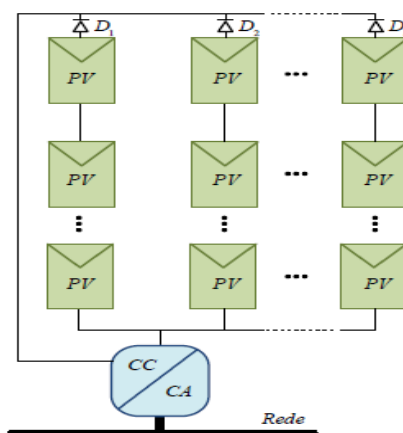


Figura 11 - Topologia com apenas um conversor para uso de múltiplos PVs (*multi strings*)
Fonte: Alves (2013)

Devido às perdas energéticas causadas pelos diodos em série nos ramos na configuração *multi string*, um novo rearranjo desta configuração foi feita: uso de células em série para formar apenas um ramo. Assim, não é mais preciso o uso de diodos para evitar fluxo de potência. Com relação ao algoritmo de MPPT, opta-se pelo uso de poucos painéis para que a técnica trabalhe com bons resultados, pois com poucos PVs, o grau de incidência solar é mais semelhante entre eles. Por usar poucos painéis, geralmente de 2 a 5, este é considerado um sistema de média potência (500W a 1000W).

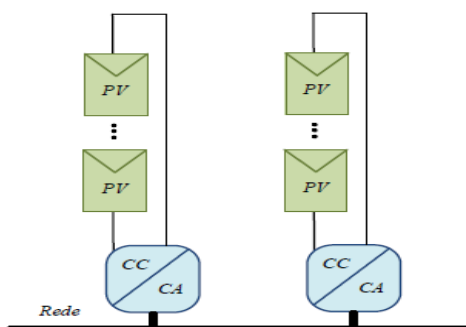


Figura 12 - Configuração em String para conversores solares.
Fonte: Alves (2013)

Em certos casos quando os conversores não são galvanicamente isolados (sem transformador) a forma de obter ganho de tensão é por etapas elevadoras, lembrando que esta etapa apenas eleva a tensão e não converte a energia de CC para CA. Em seguida, serão apresentadas algumas topologias usuais de etapas elevadoras usadas em PVs.

2.5.2. CONVERSOR CC-CC BOOST CLÁSSICO

Esta é considerada a topologia mais básica e a mais utilizada para realizar esta tarefa. Pode ser chamada também de *Step-Up*. Basicamente ele é composto por um indutor (L) em série com uma fonte (E), um transistor (S) operando como um interruptor, um diodo (D), um capacitor (C) e a carga (R).

Neste tipo de conversor, a tensão média de saída é maior que a respectiva tensão de entrada. Portanto, o menor valor de tensão média na saída é igual ao da tensão de alimentação. Obrigatoriamente um indutor deve ser colocado em série com a fonte, fazendo com que esta trabalhe como uma fonte de corrente (BARBI, 2000).

O conversor *Boost* ideal é aquele capaz de produzir qualquer tensão de saída maior que a tensão de entrada, sendo obvio também que há limites na tensão de saída na construção e projeto prático de conversor (ROBERT W. ERICKSON; DRAGAN MAKSIMOVIC; 2004).

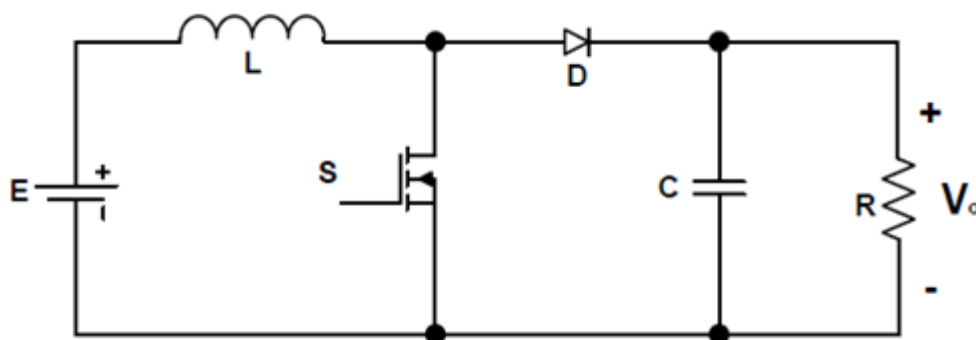


Figura 13 - Conversor *Boost* Clássico
Fonte: Font (2013)

O funcionamento desta topologia deve ser analisado em duas etapas. Primeiramente, ao fechar o interruptor S, o diodo D entrará em bloqueio por estar polarizado reversamente, pois a tensão de saída é maior que a tensão de

entrada ($V_o > E$). Desta forma, o estágio de saída da fonte é isolado estando curto circuitada nesse momento. Quando o transistor S é chaveado, toda a tensão da fonte é aplicada no indutor L, fazendo com que a corrente de entrada cresça. Sendo assim, o indutor L acumula energia, havendo uma transferência para o capacitor C quando o interruptor S é aberto. Com relação ao diodo, sua corrente é nula e a corrente que passa por S é igual a corrente de L. Ao abrir a chave S, esta etapa é finalizada.

A corrente do diodo D sempre será descontínua neste tipo de conversor, ao contrário da corrente de entrada no indutor L, que pode ser contínua ou descontínua. No tempo onde o transistor não se encontra fechado, a tensão de L é a diferença de tensão entre saída e entrada (BARBI, 2000).

Uma informação importante de projeto é que os componentes D e S devem aguentar uma tensão igual à tensão de saída. A equação abaixo refere-se ao ganho estático do conversor:

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$$

Com relação às variáveis da equação, V_o é a tensão média de saída e V_{in} é a tensão média de entrada. O ganho é dado por G e a razão cíclica e dada por D . Razão cíclica pode ser definida como a razão do tempo de condução do transistor (T_{on}) e o período de comutação (T).

$$D = \frac{T_{on}}{T}$$

Para maiores valores de D , maior será a tensão média de saída, sendo D considerada uma grandeza adimensional, variando entre 0 e 1. O fluxo de potência que ocorre entre fonte e carga é controlado pela razão cíclica, sendo esta um parâmetro de controle do conversor. O ganho estático, em outras palavras, é como se fosse a relação de espiras de um transformador, análogo a transformação de energia do conversor CC-CC (FONT, 2013).

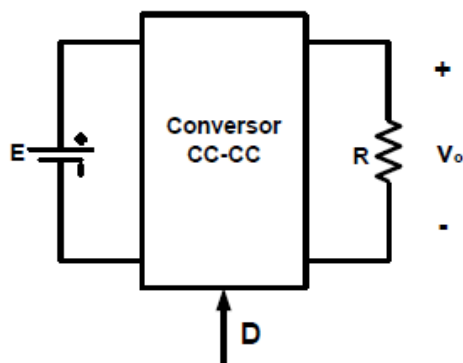


Figura 14 – Esquema da atuação da razão cíclica (D) no conversor.
Fonte: Font (2013)

Fazendo uma análise na equação do ganho, verifica-se que G tende ao infinito quando D tende a 1 (um). O ganho deste tipo de conversor, na prática, é projetado para ser menor que 10. Isso é feito para evitar perdas em elementos passivos (indutores e capacitores), incluindo semicondutores. Um alto ganho é preciso para que D opere perto do valor um, sendo que nessa situação, a menor variação de D causa uma grande variação no ganho G . Isso gera certa dificuldade no sistema de controle e a resposta dinâmica do conversor. Na elaboração de um projeto, alguns empecilhos podem causar perdas e diminuindo o ganho do conversor: perdas por comutação, queda de tensão em dispositivos semicondutores, resistência série dos componentes indutivos e capacitivos, dentre outros (ALVES, 2013).

A figura 15 mostra um gráfico relacionando $G \times D$ característico do conversor *Boost*, sendo RL resistência série do indutor e R a resistência da carga.

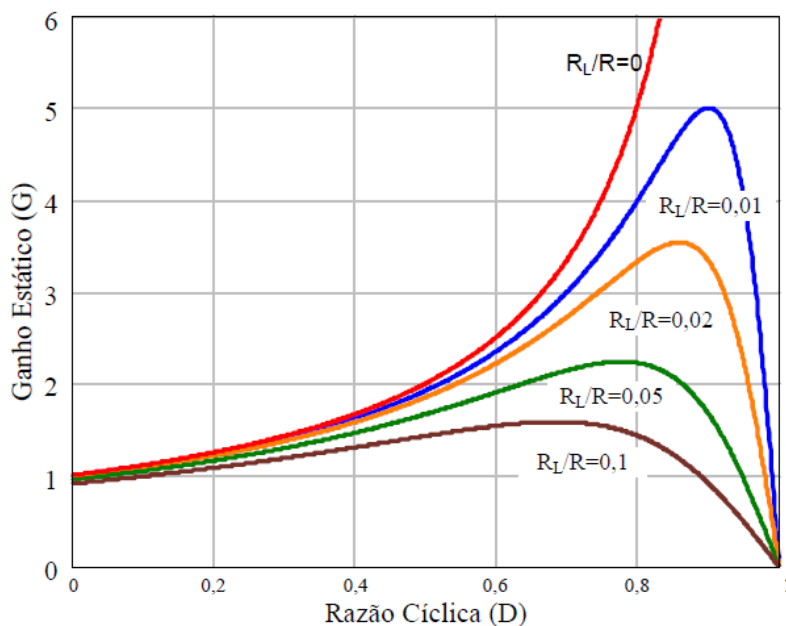


Figura 15: Ganho estático do conversor *Boost* em função da razão cíclica, para o caso ideal e para diversos valores de $\frac{R_L}{R}$.
Fonte: Sampaio (2013)

A relação $G \times D$ da figura mostra uma situação ideal ($R_L/R=0$), e algumas curvas não ideais que ocorrem devido à variação da resistência série do indutor. O ganho pode ser comprometido devido às variações entre as resistências, e em certo ponto, verifica-se que o ganho pode ser inviável dependendo da resistência série do indutor, dificultando o projeto (SAMPAIO, 2013).

2.5.3. CONVERSOR *BUCK*

Este conversor gera uma tensão média de saída abaixo do valor médio de tensão de entrada, sendo um conversor CC-CC abaixador de tensão. Entretanto, a corrente média de saída é maior que a corrente média de entrada. O conversor *Buck* é projetado para entregar uma tensão na carga variando entre zero até o valor da tensão da fonte (BARBI, 2000).

Considerando a razão cíclica D variando entre 0 e 1, para $D = 0$ (chave permanentemente aberta) tem-se tensão zero. Para $D = 1$, tem-se a tensão de saída igual à fonte de alimentação para este conversor. O ganho estático é a razão entre a tensão média de saída e a tensão de entrada. Há então, para

este conversor operando no modo de condução contínua (MCC) onde a corrente esta sempre fluindo pelo indutor ($I_L > 0$), a seguinte razão:

$$\frac{V_0}{E} = D$$

O funcionamento dessa topologia pode ser apresentado basicamente em duas etapas. Primeiramente, o interruptor S (transistor), esta fechado e a corrente de carga circula pela fonte E, onde há a transferência de energia da fonte para a carga. Com o interruptor aberto, a corrente de carga então circula pelo diodo (roda-livre), na qual sem este diodo o transistor se danificaria nas transições das etapas (BARBI, 2000).

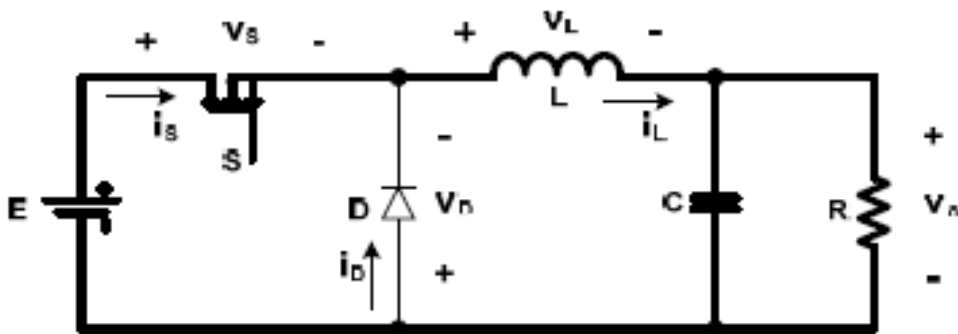


Figura 16 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor *Buck*
Fonte: Font (2013)

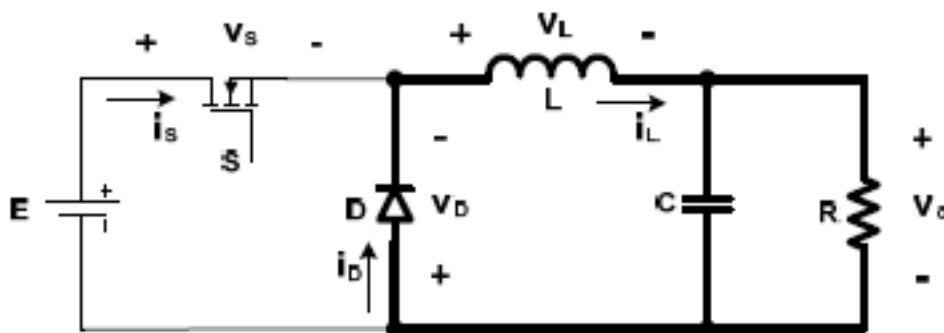


Figura 17 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor *Buck*
Fonte: Font (2013)

2.5.4. CONVERSOR *BUCK-BOOST*

Este conversor é usado para controlar o fluxo de energia entre duas fontes de tensão (uma fonte de tensão e uma carga com características de fonte de tensão). O indutor neste circuito comporta-se como um armazenador,

pois não existe a possibilidade de transferir energia entre duas fontes de tensão de forma direta. Sendo assim, a energia é armazenada no indutor e depois entregue à carga (BARBI, 2000).

Com relação às etapas de funcionamento, na primeira etapa, o interruptor S (transistor) está fechado, de maneira que a energia da fonte E se acumula no indutor L. Neste momento o diodo D está bloqueado. Quando o interruptor abre, ocorre inversão de polaridade do indutor de forma a polarizar diretamente o diodo D (entra em condução). A energia que se acumulou no indutor na primeira etapa é transferida para a carga, de forma que a polaridade seja invertida em relação à fonte. O ganho deste conversor se dá pela seguinte equação:

$$\frac{V_o}{E} = \frac{D}{1 - D}$$

O conversor *Buck-Boost* pode ser abaixador de tensão operando com razão cíclica $D < 0,5$ ou elevador de tensão operando com $D > 0,5$ (BARBI, 2000).

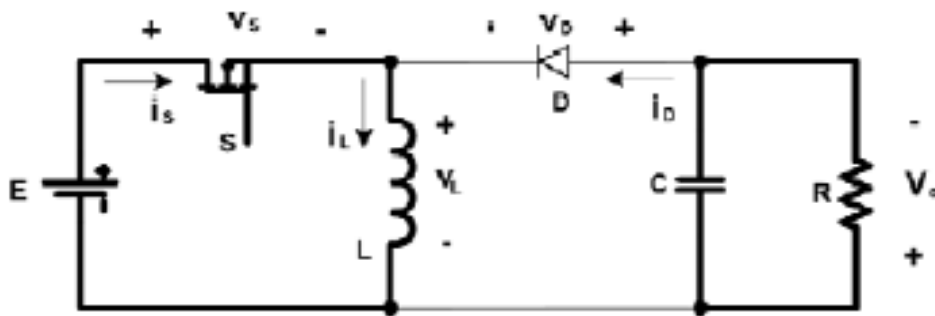


Figura 18 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor *Buck-Boost*
Fonte: Font (2013)

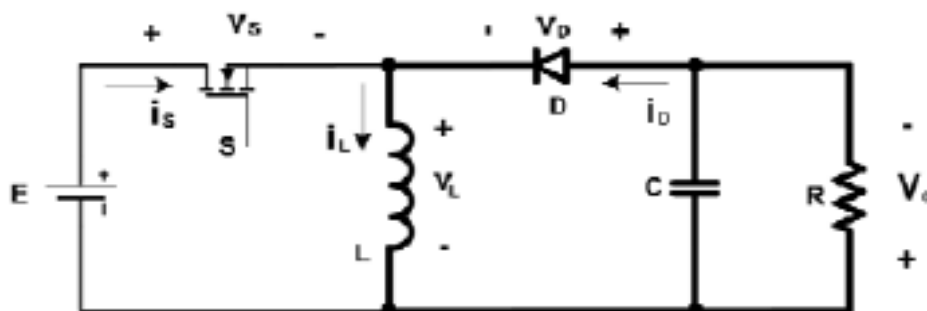


Figura 19 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor *Buck-Boost*
Fonte: Font (2013)

2.5.5. CONVERSOR CÚK

O conversor *Cúk* é empregado quando deseja-se controlar o fluxo de energia entre uma fonte de corrente contínua e uma carga com característica de fonte de corrente contínua, sendo este um conversor à acumulação capacitiva (assim como o *Buck-Boost* precisa de um indutor intermediário, este emprega um capacitor para armazenar a energia advinda de uma fonte antes de transferir para a carga). Como o *Cúk* pode fazer a transferência de energia entre duas fontes de corrente contínua, sua entrada tem característica de fonte de corrente na qual transfere energia para o capacitor (característica de fonte de tensão) e logo após, o capacitor (entrada fonte de tensão), transfere energia para à carga com característica de fonte de corrente (BARBI, 2000).

Neste conversor, a transferência de energia entre a fonte e a carga é feita por um capacitor, sendo capacitor C1 da Figura 20 responsável pela troca de energia entre a entrada e saída. Nesta topologia, a tensão de saída tem polaridade invertida em relação à fonte de tensão. Uma vantagem que pode ser destacada no *Cúk* correspondem às reduzidas ondulações de corrente tanto de entrada quanto de saída, podendo estas serem reduzidas ainda mais se as indutâncias forem mutuamente acopladas. A desvantagem é justamente a utilização do capacitor para transferência de energia entre a entrada e saída, sendo mais eficiente em potências não tão altas. Para potências mais elevadas, seria necessário aumentar a capacitância C1, o que resultaria em perdas no capacitor (SANTOS, 2015).

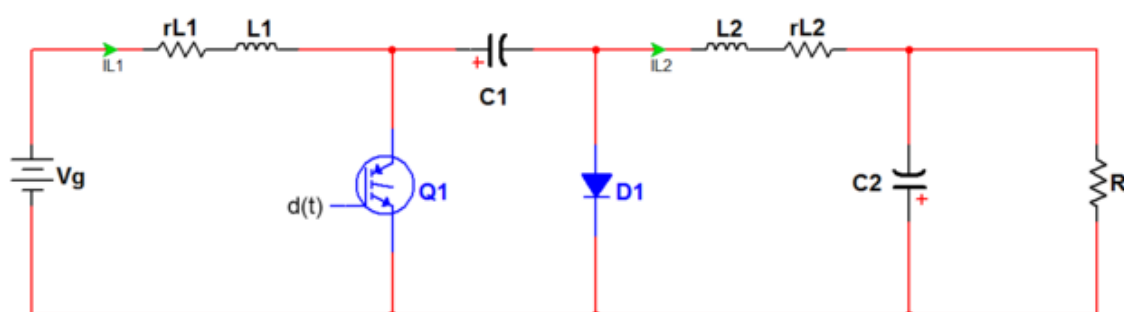


Figura 20 - Conversor CC *Cúk*
Fonte: Santos (2015)

Este conversor pode operar no modo de condução contínuo, onde a tensão no capacitor não se anula e pode operar no modo de condução

descontínuo, na qual é caracterizado pela descarga total do capacitor. No modo contínuo, o ganho de tensão tem dependência única da relação cíclica ao contrário do modo descontínuo, que depende da resistência de carga e da frequência de comutação (SANTOS, 2015).

As Figuras 21 e 22 representam o modo de condução contínuo. Considerando a chave fechada, a fonte V_g armazena energia na indutância $L1$ enquanto o capacitor $C1$ com tensão $V1$ transfere energia pela indutância $L2$ para alimentar a carga. O diodo $D1$ não conduz nesta etapa por estar reversamente polarizado pela tensão $V1$ proveniente do capacitor $C1$.

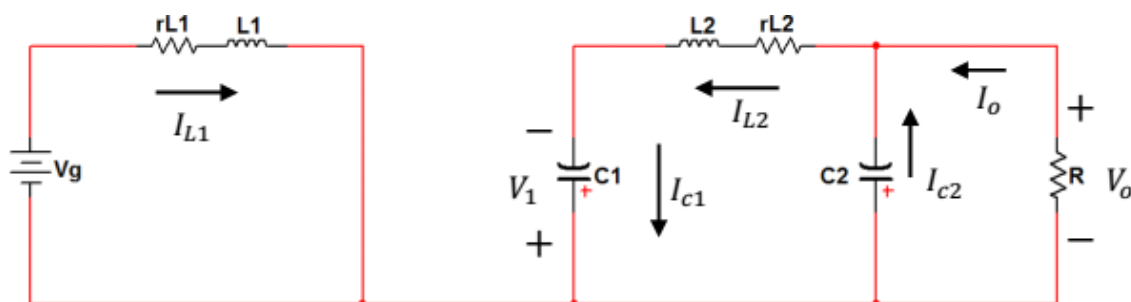


Figura 21 - Circuito Cúk com chave fechada
Fonte: Santos (2015)

Quando a chave é aberta, ocorre a polarização do diodo $D1$ e começa a conduzir a corrente I_{L1} . Esta corrente carrega o capacitor com uma tensão superior a da fonte de entrada e a carga passa a receber a energia que fora armazenada na indutância $L2$ (SANTOS, 2015)

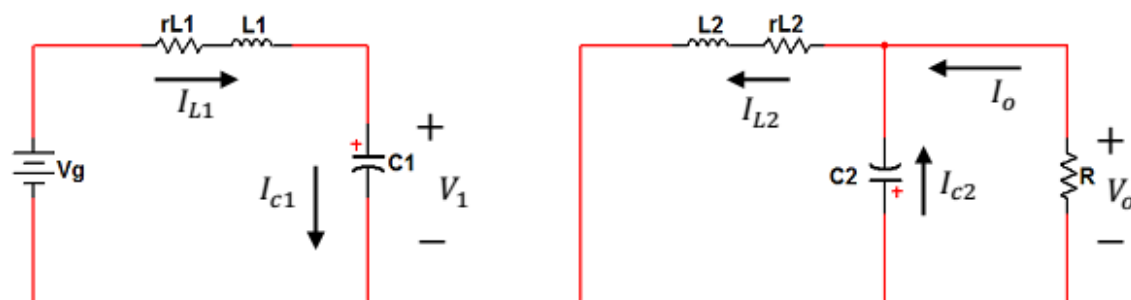


Figura 22 - Circuito Cúk com chave aberta
Fonte: Santos (2015)

A vantagem do conversor Cúk é que os indutores regulam a corrente da fonte e a corrente de saída, algo que não ocorre nos conversores clássicos. Além disso, a necessidade de filtragem externa é reduzida. Como

desvantagens, este apresenta um maior número de dispositivos de filtragem além de um capacitor com maior capacidade de regulação (SIMAS, 2015).

O *Cúk* é um conversor que gera tensão e corrente de saída ajustável através da carga periódica do capacitor. A tensão de saída pode ser ajustada entre 0V até algumas vezes o valor de tensão de entrada variando-se apenas a razão cíclica do mesmo. Sendo assim, este combina tanto as características de um conversor abaixador quanto de um conversor elevador (XIAO, 2011).

A Figura 23 apresenta o circuito do conversor *Cúk* com todos os parâmetros para o entendimento das principais formas de onda (Figura 24) na qual serão usadas como base para o equacionamento matemático do *Cúk* na sessão 4. Para a Figura 24:

t_c = tempo em que a chave S permanece conduzindo

t_a = tempo em que a chave S permanece aberta

$$T = t_c + t_a = \frac{1}{f}$$

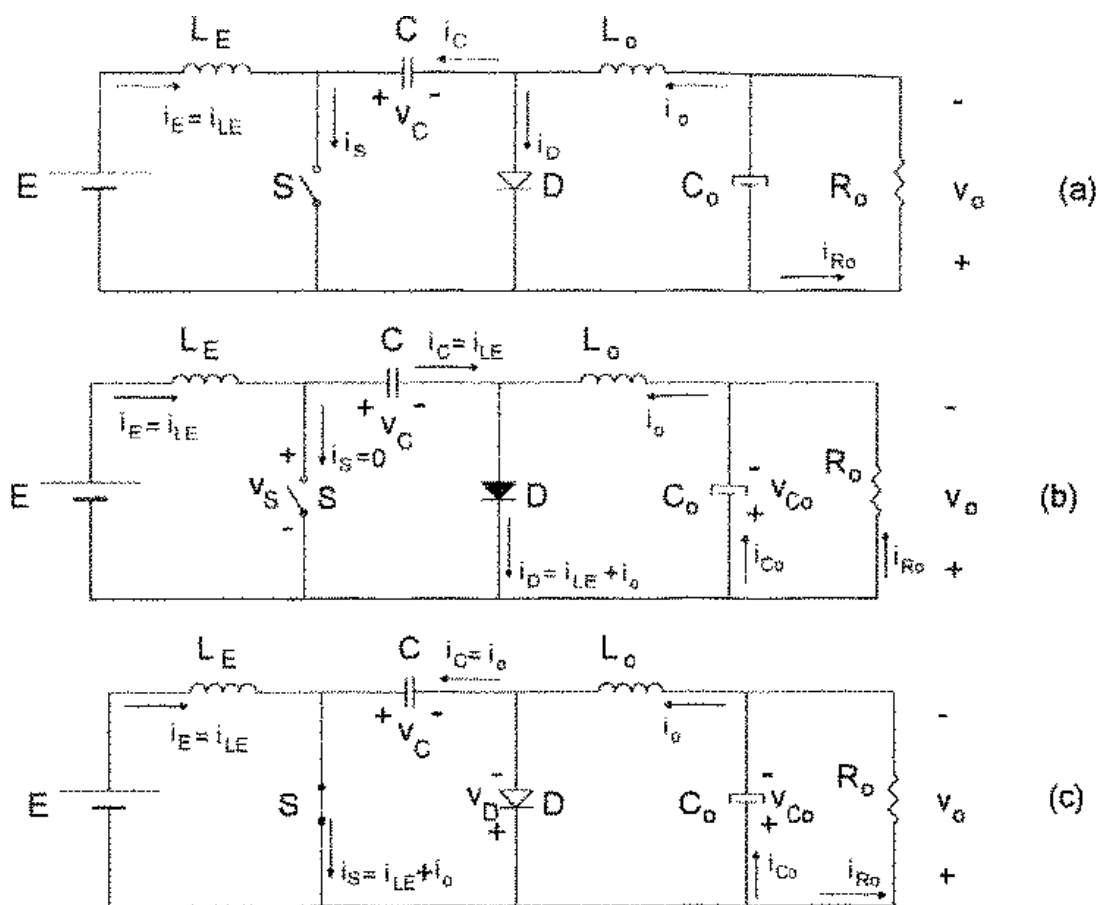


Figura 23 - Circuito de potência real do conversor *Cúk*
Fonte: Barbi (2000)

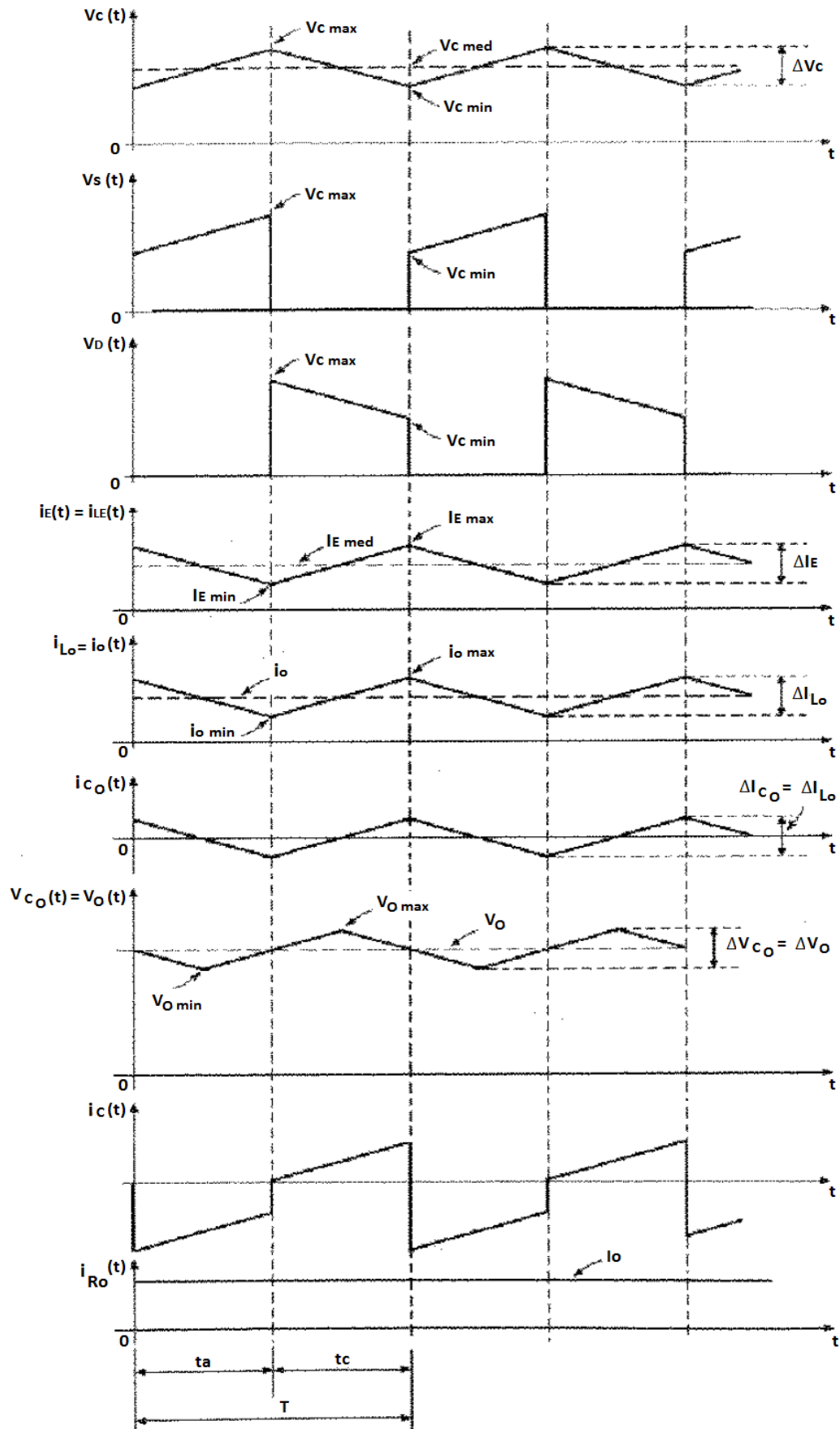


Figura 24 - Formas de onda para regime permanente (Cúk)

Fonte: Adaptado de Barbi (2000)

2.6. BATERIAS E CARREGADORES

2.6.1. BATERIAS

De acordo com a fabricação do metal das placas, considerando o aspecto construtivo das baterias, estas podem ser alcalinas (níquel-cádmio) e ácidos (chumbo-ácido). Com relação ao eletrólito, as baterias seladas (reguladas por válvula) tem o eletrólito imobilizado e não precisam de adição de água. Emitem baixa quantidade de gases e podem ser aplicadas com equipamentos eletrônicos. Já as baterias do tipo ventiladas possuem eletrólito líquido livre dentro da célula e durante a sua vida útil há a necessidade de adição de água. Por emitirem muitos gases, não permitem serem usadas junto com equipamentos eletrônicos (NIFE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2015).

Em se tratando de aplicações para sistema solares, baterias do tipo estacionárias são as mais indicadas pois estas suportam altas descargas, sendo que outras baterias não suportariam. Devido a características de projeto, baterias automotivas fornecem correntes elevadas durante as partidas do veículo em curtos espaços de tempo, contudo, sua vida útil é muito reduzida em sistemas solares por não suportarem descargas profundas (NEOSOLAR ENERGIA, 2015).

2.6.2. TENSÃO DE FLUTUAÇÃO E DE CARGA

Tensão de flutuação é o nível de tensão que os retificadores ou saída de um sistema fornecem à carga mantendo a bateria carregada sem fornecer corrente. São fornecidos em média 2V/el (volts por elemento) por uma bateria estacionária. Tendo esta 6 elementos, sua tensão nominal é de 12V, assim como nas automotivas. Submetendo a bateria a uma tensão maior, há então duas fontes de corrente contínua em paralelo e toda corrente será fornecida pela fonte de maior potencial. Tensão de flutuação é a tensão na qual a bateria não fornece corrente pela razão de estar em paralelo com uma fonte de tensão mais elevada. A bateria se mantém carregada pronta para fornecer energia caso haja interrupção de fornecimento de energia pelos retificadores ou sistema. A maior parte das baterias seladas têm uma tensão de flutuação de

2,23V/el a 25°C mas de forma genérica a tensão de flutuação deve ser mantida a 2,2V/el.

Tensão de carga é uma tensão maior que a de flutuação e é aplicada apenas para baterias ventiladas. Nas baterias seladas (automotivas ou estacionárias) a carga é feita sob tensão de flutuação, havendo diminuição da corrente de carga em relação ao tempo (TELECO, 2015).

2.6.3. CAPACIDADE E UTILIZAÇÃO

Multiplicando-se a corrente de descarga pelo tempo de autonomia, se obtém a capacidade de armazenamento de energia de uma bateria em Ampére-hora (Ah). Por exemplo, uma bateria sendo submetida a uma corrente de descarga de 5A e apresentando uma autonomia de 20h é uma bateria de 100Ah. O tempo de autonomia da bateria é medido entre as tensões de carga plena ($\approx 13,8V$) e tensão mínima ou de corte (10,5V). Este intervalo representa toda a capacidade da bateria que foi usada.

Como as baterias não são lineares, uma maior corrente de descarga resulta em uma autonomia menor, sendo assim, não é correto designar-se a uma bateria de 100Ah quando comparar baterias de marcas ou modelos diferentes. Deve-se descrever da seguinte maneira: bateria de 100Ah padrão de descarga 20h e tensão de corte 10,5V com $T=25^{\circ}C$ ou $T=20^{\circ}C$ sendo a temperatura ótima para otimizar a vida útil. Assim, esta bateria irá fornecer 5A por 20 horas quando atingir 10,5V operando nas devidas temperaturas. Com todos os parâmetros, pode-se fazer uma comparação mais criteriosa entre baterias diferentes e não descrevendo apenas como uma bateria de 100Ah (UNICOBA, 2015).

2.6.4. CARREGADORES

Carregadores de carga cíclica são usados para carregar totalmente uma bateria para que a mesma forneça energia de forma isolada para uma carga ou também para carregar baterias de carro. A tensão final de carga é maior (14,8V) e por este motivo a bateria não deve estar conectada a nenhum aparelho durante o processo de carga.

A tensão de operação para carregador de flutuação é menor (13,8V), na qual mantém essa tensão. Pode estar conectado com a bateria e alimentando outras cargas ao mesmo tempo ou, de acordo com o estado de descarga da bateria, ter um circuito de conexão e desconexão.

Na utilização de uma bateria chumbo-ácido de 12V, as tensões mínimas e máximas são de 10,5V e 14,8V respectivamente. A vida útil da bateria decresce muito caso não seja operada neste intervalo. Uma bateria suporta poucos ciclos de descarga profunda (10,5V), tornando-se sulfatada, ou seja, indica como se tivesse carregada mas perde carga em pouco tempo (HAYAMA, 2015).

3. SISTEMA IMPLEMENTADO

O sistema implementado neste trabalho foi projetado para fornecer energia elétrica às cargas remotas para uma alimentação de 12V. Dependendo da aplicação fotovoltaica e das especificações de projeto, sendo de maior ou menor potência, faz-se necessário o sistema possuir autonomia de energia, não tendo dependência da rede elétrica. Alguns exemplos são (MARTINS; RODRIGUES, 2002):

- estações meteorológicas;
- eletrificação rural (sistemas individuais ou em mini-rede);
- bombeamento de água (irrigação e abastecimento);
- sistemas ligados à rede com centrais PV (>100KWp) ou "telhados" com PV (1-10KWp);
- sistemas de telecomunicações (retransmissores de TV, rádio);
- sinalização ferroviária (passagens de nível);
- sinalização marítima (bóias, faróis);
- sinalização em estradas (sinais de aviso);
- telefone SOS em estradas;
- outros.

O projeto atende a várias aplicações. A aplicação em que houve maior embasamento foi com relação ao uso para estações meteorológicas, pois muitas destas demandam 12V para atenderem ao seu funcionamento.



Figura 25 - Estação meteorológica GRWS100 *Campbell Scientific*
Fonte: Campbell Scientific (2015)

O sistema fará uso de bateria para armazenar a energia gerada pelo PV. Isso torna possível a utilização do conjunto durante o período da noite e em tempos nublados ou com baixa incidência de luz solar. Nestas ocasiões, não há geração de energia suficiente pelo painel, sendo assim, o uso de bateria é essencial na atuação do sistema como fonte de energia.

Na etapa de conversão CC-CC, das topologias conversoras de tensão anteriormente citadas, foi escolhido o conversor *Cúk*. Ele é empregado quando deseja-se controlar o fluxo de energia entre uma fonte de corrente contínua e uma carga com característica de fonte de corrente contínua. Assim, o conversor comporta-se como fonte CC e injeta corrente na bateria.

Outro motivo para escolha do *Cúk* é a vantagem do mesmo nas reduzidas ondulações de corrente de entrada e de saída, podendo estas serem reduzidas ainda mais se as indutâncias forem mutuamente acopladas.

O sistema completo de conversão de energia é composto pelo PV seguido do conversor CC-CC (*Cúk*) para redução da tensão, uma bateria em paralelo ao conversor e esta conectada a uma carga. A tensão de entrada proveniente do painel é de 16,6V e o conversor é projetado para fornecer uma tensão de 12,5V a uma bateria por injeção de corrente.

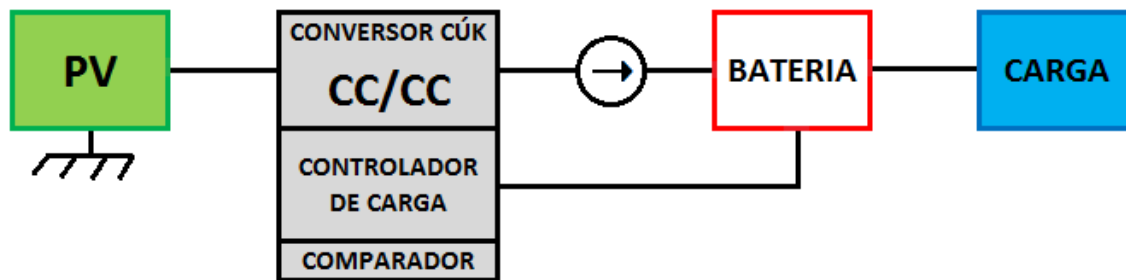


Figura 26: Estrutura do sistema

Resumidamente o sistema comporta-se da seguinte maneira:

- 1) Dia - PV alimenta bateria e esta alimenta a carga
- ↓↑
- 2) Noite - Bateria alimenta a carga

No circuito de controle de carga fornecida pelo conversor, foi usado como modulador de largura de pulso o CI SG3524 da *Texas Instruments*. Na

estrutura do sistema (Figura 26), há um circuito comparador juntamente com o controlador de carga. Sua principal aplicação seria carregar a bateria até um valor máximo e também não deixá-la ser descarregada abaixo de um valor mínimo. Funcionamento detalhado do comparador:

- Desligar carregador quando bateria $\geq 13,5V$ (ou seja, cortar o fornecimento de energia do PV para o conversor)
- Ligar carregador (*Cúk*) quando bateria $\leq 11,5V$

Este é apenas um comparador teórico e de simples aplicação para melhor explicação e entendimento do sistema como um todo, não sendo implementado devido que o projeto é de maior ênfase no conversor de potência *Cúk*.

A técnica de MPPT utilizada neste trabalho foi o da Tensão Constante, por ser um método de simples implementação. O método da Tensão Constante mantém o PV operando em um valor de tensão fixo, mesmo para diferentes condições de operação (MATTOS et al, 2011).

A bateria regula tanto a tensão a ser fornecida à carga quanto a tensão nos terminais da fonte fotovoltaica. O ganho estático do *Cúk* será usado como técnica de MPPT neste caso. O próprio ganho estático estipula o MPPT do tipo Tensão Constante. A Figura 27 mostra a curva de corrente e tensão do PV, onde há valores que foram adquiridos das informações técnicas contidas no PV tais como: corrente de curto circuito (I_{SC} - short-circuit current), tensão de circuito aberto (V_{OC} - open-circuit voltage), corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP} - current in the maximum power point), tensão no ponto de máxima potência (V_{MPP} - voltage in the maximum power point) e potência no ponto de máxima potência (P_{MPP} - power in the maximum power point).

O valor de tensão 16,6V (V_{MPP}) foi usado para a técnica de tensão constante.

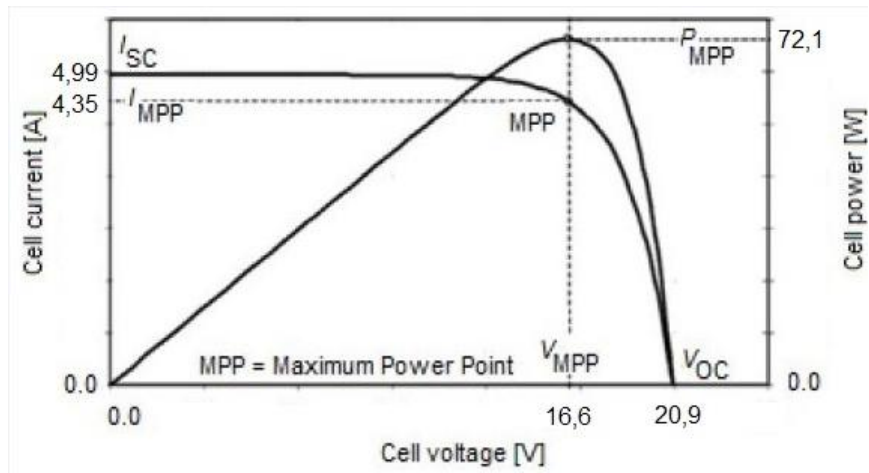


Figura 27 - Curva I-V painel SOLAREX IMSX70
Fonte: Adaptado de MÍREZ (2015)

4. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO CONVERSOR CÚK

A partir das formas de onda do conversor Cúk (Figura 24) e suas etapas de funcionamento do circuito real de potência (Figura 23), são realizados os seguintes equacionamentos:

$$V_{L1} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{in}}{\Delta t} \quad \therefore \quad V_{in} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{in}}{D \cdot T_s} \quad \rightarrow \quad \Delta I_{in} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T_s}{L_1} \quad \text{ou} \quad L_1 = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{in} \cdot f_s}$$

Chave aberta:

$$V_{in} - V_{L1} - V_c = 0 \quad \therefore \quad V_{L1} = V_{in} - (V_{in} + V_{out})$$

$$V_{L1} = -V_{out} = L_1 \cdot \left(-\frac{\Delta I_{in}}{\Delta t}\right) \quad \therefore \quad V_{out} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{in}}{(1-D) \cdot T}$$

Do balanço de tensões:

$$\frac{V_{in} \cdot D \cdot T_s}{L_1} = \frac{V_{out} \cdot (1-D) \cdot T_s}{L_1} \quad \therefore \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D \cdot T_s}{(1-D) \cdot T_s} = \frac{D}{1-D} \quad \rightarrow \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} = G$$

$$\frac{1}{\frac{1}{D} - 1} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad \therefore \quad \frac{1}{D} - 1 = \frac{V_{in}}{V_{out}} + 1 = \frac{V_{in} + V_{out}}{V_{out}} \quad \rightarrow \quad D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$$

Da corrente em L_2 tem-se:

$$V_{L2} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{out}}{\Delta t} \quad \therefore \quad V_{in} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{out}}{D \cdot T_s} \quad \rightarrow \quad \Delta I_{out} = \frac{V_{in} \cdot D}{L_2 \cdot f_s} \quad \text{ou} \quad L_2 = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{out} \cdot f_s}$$

Ondulação no capacitor:

$$Q = C \cdot V \quad \therefore \quad \Delta Q = C \cdot \Delta V \quad \therefore \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = i \quad \text{ou} \quad \Delta Q = \int_0^{(1-D)T_s} i_{in} \cdot dt$$

$$\Delta Q = \int_0^{D \cdot T_s} i_{out} \cdot dt = D \cdot T_s \cdot \left(\frac{I_{out_{pico}} + I_{out_{min}}}{2}\right)$$

$$\Delta Q = \frac{D}{2 \cdot f_s} \cdot (I_{out_{pico}} + I_{out_{min}}) \quad \therefore \quad \Delta Q = \frac{D}{2 \cdot f_s} \cdot (2 \cdot I_{out}) \quad \therefore \quad \Delta Q = \frac{D \cdot I_{out}}{f_s}$$

$$\text{Assim, } C \cdot \Delta V = \frac{D \cdot I_{out}}{f_s} \quad \rightarrow \quad C = \frac{D \cdot I_{out}}{f_s \cdot \Delta V_c} \quad (\text{Obs: } V_{c_{med}} = V_{in} + V_{out})$$

Obs: Q = quantidade de carga elétrica (C)

Modelagem

1) Chave fechada

$$V_{in} = V_{L1} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in}}{L_1}$$

$$V_C - V_{out} - V_{L2} = 0 \quad \therefore \quad L_2 \frac{di_2}{dt} = V_C - V_{out} \quad \rightarrow \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{V_C - V_{out}}{L_2}$$

$$i_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} = -i_2 \quad \rightarrow \quad \frac{dV_C}{dt} = -\frac{i_2}{C}$$

2) Chave aberta

$$V_{in} - V_L - V_C = 0 \quad \therefore \quad V_L = V_{in} - V_C = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in} - V_C}{L_1}$$

$$V_{L2} = -V_{out} = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{di_2}{dt} = -\frac{V_{out}}{L_2}$$

$$i_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} = i_1 \quad \rightarrow \quad \frac{dV_C}{dt} = \frac{i_1}{C}$$

Média ponderada:

$$\frac{di_2}{dt} = \left[\frac{V_{in}}{L_1} \cdot D \cdot T_s + \frac{V_{in} - V_C}{L_1} \cdot T_s(1-D) \right] \frac{1}{T_s}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in}}{L_1} \cdot D + \frac{V_{in} - V_C}{L_1} \cdot (1-D) \quad \rightarrow \quad \frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in}}{L_1} - \frac{V_C}{L_1} + \frac{V_C \cdot D}{L_1}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{V_C - V_{out}}{L_2} \cdot D - \frac{V_{out}}{L_2} \cdot (1-D) \quad \therefore \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{V_C \cdot D}{L_2} - \frac{V_{out} \cdot D}{L_2} - \frac{V_{out}}{L_2} + \frac{V_{out} \cdot D}{L_2}$$

$$\rightarrow \quad \frac{di_2}{dt} = -\frac{V_{out}}{L_2} + \frac{V_C \cdot D}{L_2}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{i_2}{C} \cdot D + \frac{i_1}{C} \cdot (1-D) \quad \therefore \quad \frac{dV_C}{dt} = -\frac{i_2}{C} \cdot D + \frac{i_1}{C} - \frac{i_1}{C} \cdot D$$

$$\rightarrow \quad \frac{dV_C}{dt} = \frac{i_1}{C} - \frac{i_1}{C} \cdot D - \frac{i_2}{C} \cdot D$$

Ponto de equilíbrio:

$$V_{in} - V_C + V_C \cdot D = 0 \quad (1)$$

$$V_{out} = V_C \cdot D \quad (2)$$

$$i_1 - i_1 \cdot D - i_2 \cdot D = 0 \quad (3)$$

$$\text{Obs: } V_C = V_{in} + V_{out}$$

De (1) tem-se:

$$V_{in} - V_{in} - V_{out} + (V_{in} + V_{out}) \cdot D = 0$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$$

De (2) tem-se:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$$

De (3) tem-se:

$$a) D \cdot (i_1 + i_2) = i_1 \quad \rightarrow \quad D = \frac{i_1}{i_1 + i_2}$$

$$b) i_1(1-D) = i_2 \cdot D \quad \rightarrow \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{D}{1-D}$$

Sintetizando esta seção e demonstrando resumidamente o resultado do equacionamento matemático, a seguir têm-se as seguintes equações do conversor *Cúk* na qual serão usadas para o projeto do mesmo:

$$D = \frac{i_1}{i_1 + i_2} \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{D}{1-D} \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} = G \quad D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$$

$$L_1 = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_{in}} \quad L_2 = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_{out}} \quad C = \frac{D \times I_{out}}{f_s \times \Delta V_c}$$

Onde:

D = razão cíclica

L_1, L_2 = indutância de entrada e de saída, respectivamente (H)

C = capacitância (F)

G = ganho estático

V_{in}, V_{out} = tensão de entrada e saída, respectivamente (V)

$i_1; i_2$ ou I_{out} = corrente de entrada (em L_1) e corrente de saída (em L_2)

f_s = frequência de comutação (Hz)

$\Delta I_{in}, \Delta I_{out}$ = variação de corrente de entrada e saída, respectivamente (A)

ΔV_c = variação de tensão no capacitor (V)

5. PROJETO DO CONVERSOR

As especificações de projeto do conversor são:

$$V_{out} = 12,5V \quad V_{in} = 16,6V \quad I_{in} = 4,35A \quad I_{out} = ?$$

$$f_s = 20\text{KHz} \quad T = 50\mu\text{s}$$

$$\Delta V_c = 5\% \quad \Delta I_{in} = 5\% \quad \Delta I_{out} = 5\%$$

- Cálculo dos indutores:

$$L_1 = \frac{16,6 \times 0,4295}{20 \times 10^3 \times 0,2175} \approx 1,63\text{mH} \quad L_2 = \frac{16,6 \times 0,4295}{20 \times 10^3 \times 0,2889} \approx 1,23\text{mH}$$

- Razão cíclica:

$$D = \frac{12,5}{16,6 + 12,5} = 0,4295$$

- Ondulações:

$$\Delta I_{in} = 0,05 \times 4,35 = 0,2175\text{A}$$

$$\Delta I_{out} = 0,05 \times 5,778 = 0,2889\text{A}$$

$$\Delta V_c = 0,05 \times (16,6 + 12,5) = 1,45\text{V}$$

- Corrente de saída:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{D}{1-D} \quad \rightarrow \quad 4,35 = \frac{0,4295 \times i_2}{1-0,4295} \quad \rightarrow \quad i_2(\text{out}) = 5,778\text{A}$$

- Cálculo do capacitor:

$$C = \frac{0,4295 \times 5,778}{20 \times 10^3 \times 1,45} = 85,57\mu\text{F}$$

6.SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS REALIZADOS VIA SOFTWARE

A Figura 28 mostra o esquemático feito para realizar as devidas simulações do conversor *Cúk* no software PSIM®.

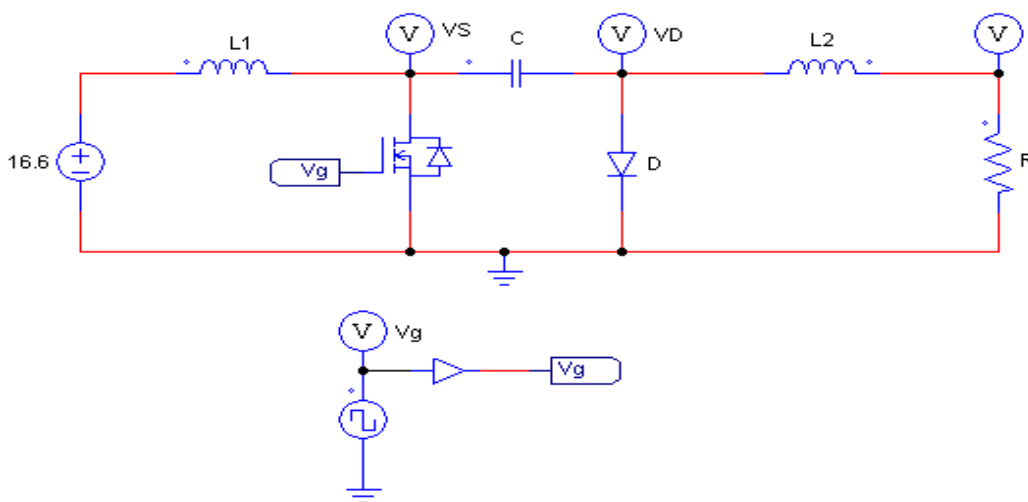


Figura 28 - Esquemático do conversor *Cúk* para simulações no PSIM®

Para realizar a simulação, uma resistência foi incluída para simular a carga (bateria). O seguinte cálculo de resistência foi feito para inserir no programa:

$$V_{out} = R \times I_{out} \quad 12,5 = R \times 5,778 \quad R = 2,1633\Omega$$

A Figura 29 mostra a corrente de entrada $I(L1)$ e a corrente de saída $I(L2)$ do conversor.

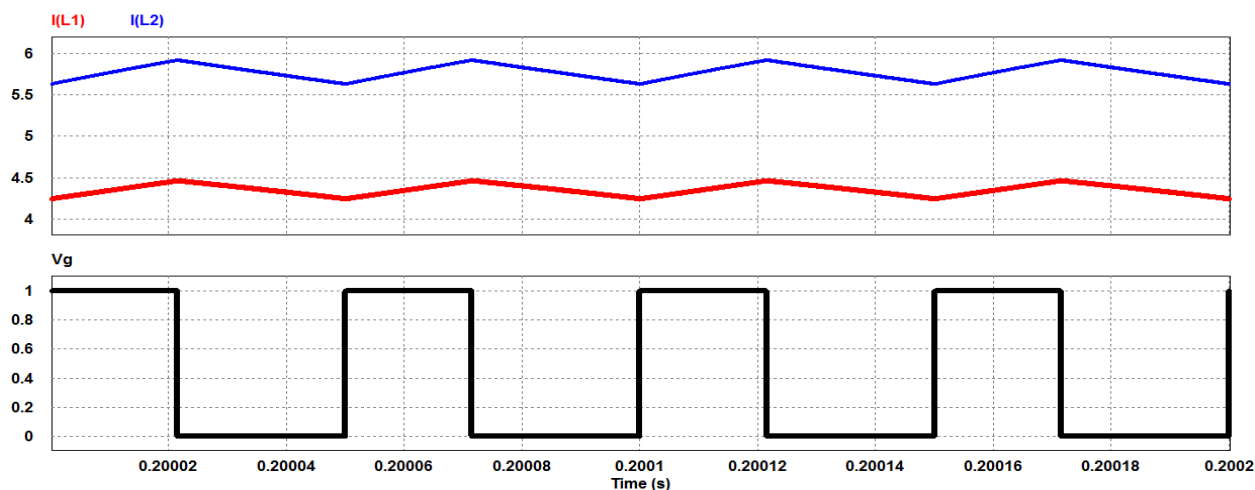


Figura 29 - Corrente de entrada $I(L1)$, corrente de saída $I(L2)$ e pulso de controle (V_g)

A Figura 30 mostra os valores de correntes de entrada e saída extraídos da simulação referente aos valores médios, máximos e mínimos respectivamente.

Average Value			Measure		Measure	
Time From		2.0000010e-001	Time	2.0002150e-001	Time	2.0005000e-001
Time To		2.0020000e-001	I(L1)	4.4579840e+000	I(L1)	4.2394634e+000
I(L1)		4.3500204e+000	I(L2)	5.9208653e+000	I(L2)	5.6313940e+000
I(L2)		5.7768664e+000				

Figura 30 - Valores de correntes (simulação)

A Figura 31 mostra a tensão (VS-VD) sobre o capacitor.

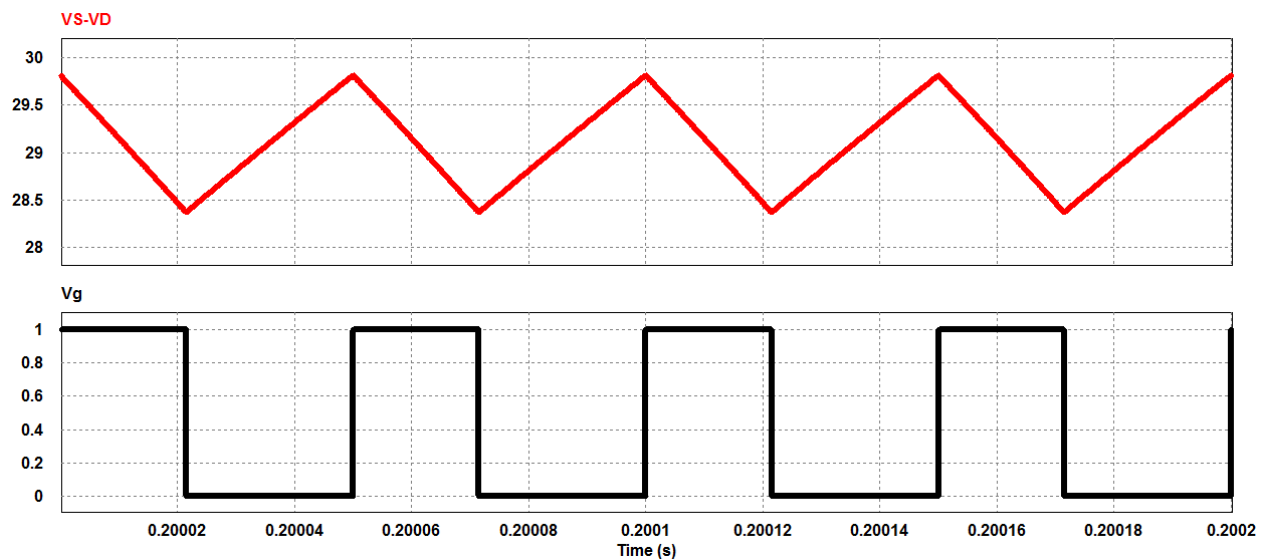


Figura 31 - Tensão sob o capacitor (VS-VD) e pulso de controle (Vg)

A Figura 32 mostra os valores da tensão média, máxima e mínima sob o capacitor, respectivamente.

Average Value			Measure		Measure	
Time From		2.0000010e-001	Time	2.0005000e-001	Time	2.0002150e-001
Time To		2.0020000e-001	VS-VD	2.9816223e+001	VS-VD	2.8367132e+001
VS-VD		2.9097097e+001				

Figura 32 - Valores de tensão (simulação)

Os valores de corrente de entrada e saída da simulação do conversor atendeu o que fora calculado e projetado, ou seja, 100% de compatibilidade.

Projetado	Simulado
$I_{in} = 4,35A$	$I_{in} = 4,35A$
$I_{out} = 5,778A$	$I_{out} = 5,7768A$

Simulação:

$I_{in\ med} = 4,35A$	$I_{in\ max} = 4,45A$	$I_{in\ min} = 4,23A$	$\neq 0,22A$
$I_{out\ med} = 5,7768A$	$I_{out\ max} = 5,92A$	$I_{out\ min} = 5,63A$	$\neq 0,29A$
$V_C\ med = 29,097V$	$V_C\ max = 29,805V$	$V_C\ min = 28,378V$	$\neq 1,427V$

$$4,35 \text{ --- } 100\% \quad \Delta I_{in} \approx 5,0\%$$

$$0,22 \text{ --- } \Delta I_{in}$$

$$5,77 \text{ --- } 100\% \quad \Delta I_{out} \approx 5,0\%$$

$$0,29 \text{ --- } \Delta I_{out}$$

$$29,0 \text{ --- } 100\% \quad \Delta V_C \approx 4,89\%$$

$$1,42 \text{ --- } \Delta V_C$$

Sendo assim, os valores obtidos na simulação referente a variação de corrente de entrada e saída e a variação da tensão no capacitor ficaram próximos do 5,0% conforme projetado.

A Figura 33 mostra o conversor Cúk com indutores acoplados, sendo este o modelo implementado, com indutância de acoplamento de 1,63mH. Como a forma de onda em cada indutor do Cúk é quase idêntica, os fluxos CA de dois indutores são os mesmos se dois enrolamentos de indutores possuem o mesmo número de espiras. Então, dois núcleos de um indutor podem ser integrados juntamente. O tamanho total dos componentes magnéticos é reduzido sem ter que aumentar a frequência de comutação. A perda de potência associada com os núcleos também é reduzida.

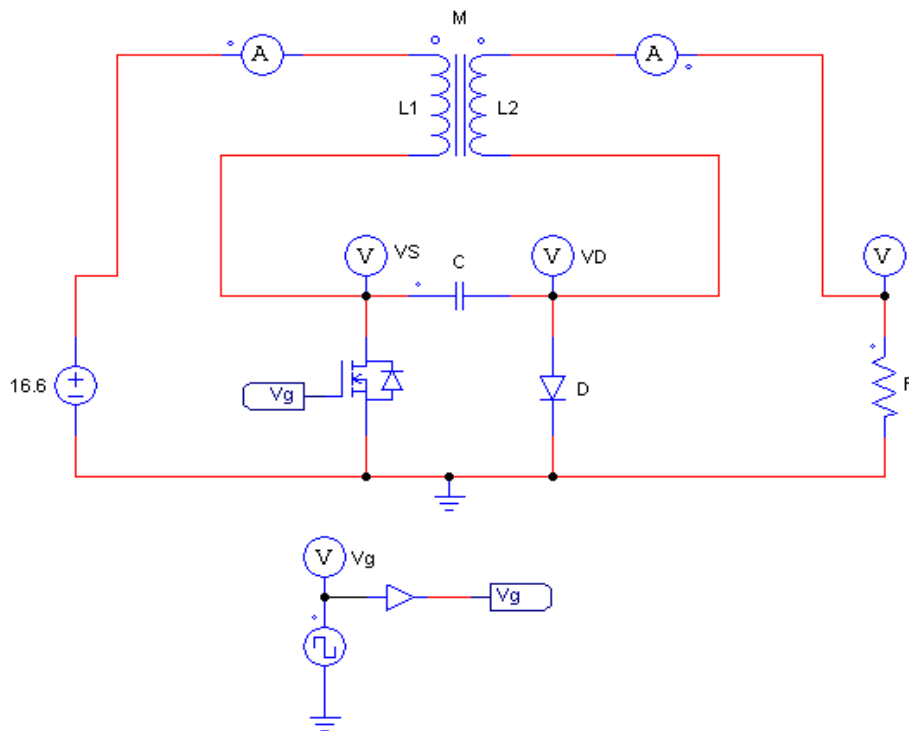


Figura 33 - Esquemático do conversor Cúk com indutores acoplados

Os resultados de correntes e tensões para os indutores acoplados foram os mesmos, contudo, houve mudança com relação as ondulações de corrente. A ondulação da corrente de entrada diminuiu de 5% para 2,5% e a ondulação da corrente de saída de 5% para 1,5%.

$$I_{in\ med}= 4,35A \quad I_{in\ max}= 4,39A \quad I_{in\ min}= 4,28A \quad \neq 0,11A$$

$$I_{out\ med}= 5,77A \quad I_{out\ max}= 5,81A \quad I_{out\ min}= 5,72A \quad \neq 0,09A$$

$$4,35 \text{ --- } 100\% \quad \Delta I_{in} \approx 2,5\%$$

$$0,11 \text{ --- } \Delta I_{in}$$

$$5,77 \text{ --- } 100\% \quad \Delta I_{out} \approx 1,5\%$$

$$0,09 \text{ --- } \Delta I_{out}$$

Average Value			Measure		Measure	
Time From		2.0000010e-001	Time	2.0002310e-001	Time	2.0005000e-001
Time To		2.0020000e-001	I1	4.3962796e+000	I1	4.2852705e+000
I1		4.3458223e+000	I2	5.8152869e+000	I2	5.7262424e+000
I2		5.7724895e+000	Vg	0.0000000e+000	Vg	1.0000000e+000
Vg		4.3000000e-001				

Figura 34 - Valores de correntes com indutores acoplados (simulação)

7. PROJETO, TESTES E RESULTADOS PRÁTICOS

7.1. PROJETO INDUTORES

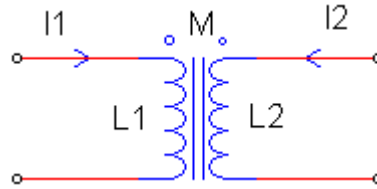


Figura 35 - Cúik com indutores acoplados magneticamente

$$W = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot I_2^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot (I_1^2 + I_2^2) \quad \therefore$$

$$\frac{1}{2} \cdot (1,639 \cdot 10^{-3}) \cdot 4,35^2 + \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 10^{-3} \cdot 5,77^2 + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{1,639 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 10^{-3}} \cdot (4,35^2 + 5,77^2) \quad \therefore$$

$$73 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot A_e \cdot l_g$$

Onde:

W = energia armazenada nos indutores acoplados magneticamente

l_g = entreferro a ser determinado [m]

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H/m}]$$

B = máxima indução no núcleo = 0,2 T

M = indutância mútua

A_e = área da coluna central do núcleo [m²]

A_w = área da janela

$$A_e \cdot A_w = \frac{L_1 \cdot I_1^2}{K_w \cdot J \cdot B_{max}} + \frac{L_2 \cdot I_2^2}{K_w \cdot J \cdot B_{max}} \quad \therefore$$

$$A_e \cdot A_w = \frac{1,639 \cdot 10^{-3} \cdot 4,35^2 + 1,23 \cdot 10^{-3} \cdot 5,77^2}{0,3 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 0,2} \quad (\text{onde: } 400 \text{ A/cm}^2 = 4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2) \quad \therefore$$

$$A_e \cdot A_w = 300 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 = 300 \cdot 10^{-9} \cdot 10^8 \text{ cm}^4 \quad \therefore$$

$$A_e \cdot A_w = 30 \text{ cm}^4 \text{ (muito grande)}$$

Onde:

J = densidade de corrente

K_w = fator de ocupação do cobre

$A_e \cdot A_w$ = produto de áreas

Solução: redução das indutâncias pela metade, mantendo as correntes como estão. O acoplamento deve manter a ondulação no valor calculado ou próximo.

Diâmetro da seção máxima do fio:

$$d = \frac{7,5}{\sqrt{20 \cdot 10^3}} = 0,053 \text{ cm} \quad \therefore$$

Diâmetro = $2 \cdot d = 0,1 \text{ cm} = 1 \text{ mm}$ (18 AWG)

Como tratam-se de indutores com baixa ondulação de 20KHz, os mesmos serão enrolados com um único fio 18 AWG. A densidade de corrente passará a 650 A/cm^2 em ambos. Da mesma forma, define-se $k_w = 0,5$ e $B_{max} = 0,25 \text{ T}$ para ambos. Assim:

$$A_e \cdot A_w = \frac{1,639 \cdot 10^{-3} \cdot 4,35^2 + 1,23 \cdot 10^{-3} \cdot 5,77^2}{0,5 \cdot 6,5 \cdot 10^6 \cdot 0,25} \quad \therefore$$

$$88,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 = 88,5 \cdot 10^{-9} \cdot (100 \text{ cm})^4 = 8,85 \text{ cm}^4$$

$$\text{Núcleo EE - 55/28/21} \quad \therefore \quad A_e = 3,54 \text{ cm}^2 \quad \therefore \quad A_w = 2,5 \text{ cm}^2 \quad \therefore \quad A_e \cdot A_w = 8,85 \text{ cm}^4$$

Este núcleo tem $l_e = 12 \text{ cm}$, $l_t = 11,6 \text{ cm}$ e $V_e = 42,5 \text{ cm}^3$

Onde:

l_e = comprimento médio do caminho magnético

l_t = comprimento médio de uma espira

V_e = volume efetivo do núcleo

A elevação das perdas no cobre será compensada pela baixa perda no núcleo. Este, não terá ciclos de magnetização e desmagnetização importantes.

$$\text{Entreferro: } \frac{l_g}{2} = \frac{\mu_o \cdot W}{B^2 \cdot A_e} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}{0,25^2 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4}} = 4,14 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4,14 \text{ mm}$$

$$3,54 \cdot (10^{-2} \text{ m})^2 = 3,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Número de espiras:

$$N_1 = \frac{L_1 \cdot I_1}{A_e \cdot B_{max}} = \frac{1,639 \cdot 10^{-3} \cdot 4,35}{1,639 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25} = 80,5 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{1,23 \cdot 10^{-3} \cdot 5,77}{3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25} = 80,2 \text{ espiras}$$

Enrolar 80,5 espiras nos dois enrolamentos.

Comprimento médio de um enrolamento:

$$l = N \cdot l_t = 80,5 \cdot 11,6 = 934 \text{cm} = 9,34 \text{m}$$

Potência dissipada em L_1 e L_2 :

$$P = N_2 \cdot I_2^2 \cdot l_t \cdot r_c + N_1 \cdot I_1^2 \cdot l_t \cdot r_c$$

$$P = 80,5 \cdot 11,6 \cdot 0,00028 \cdot (I_1^2 + I_2^2) = 13,7 \text{W}$$

0,00028 ($\frac{\Omega}{\text{cm}}$ a 100°C do fio 18 AWG)

7.2. PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Com o auxílio do software *DesignSpark* foi criado o esquemático e o circuito impresso da placa. A referência CONN1 refere-se ao borner de entrada onde o PV é conectado para alimentar o sistema. As referências CONN2 e CONN3 referem-se aos bornes dos indutores acoplados, entrada e saída de corrente respectivamente e CONN4 é o borner ou terminal de saída do conversor para conexão com a bateria.

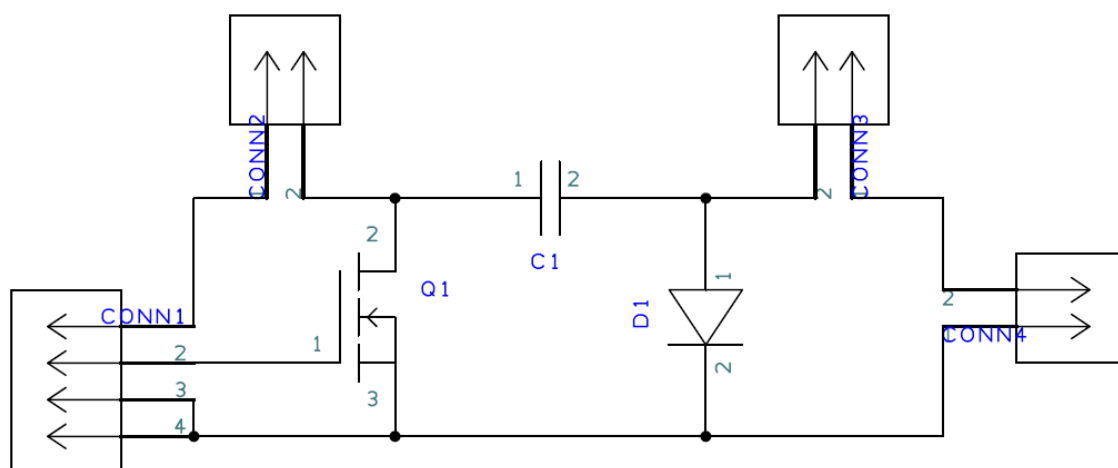


Figura 36 - Esquemático do circuito desenhado no software *DesignSpark*

Dentre os componentes utilizados, o capacitor utilizado foi um Capacitor polipropileno de partida para motor, 100 $\mu\text{F}/250\text{VCA}$, 50/60Hz - Faston,

referenciado como C1. O transistor (referência Q1) é um MOSFET IRF630, 9A, 200V. Para o diodo (referência D1) fez-se uso de um MUR1560.

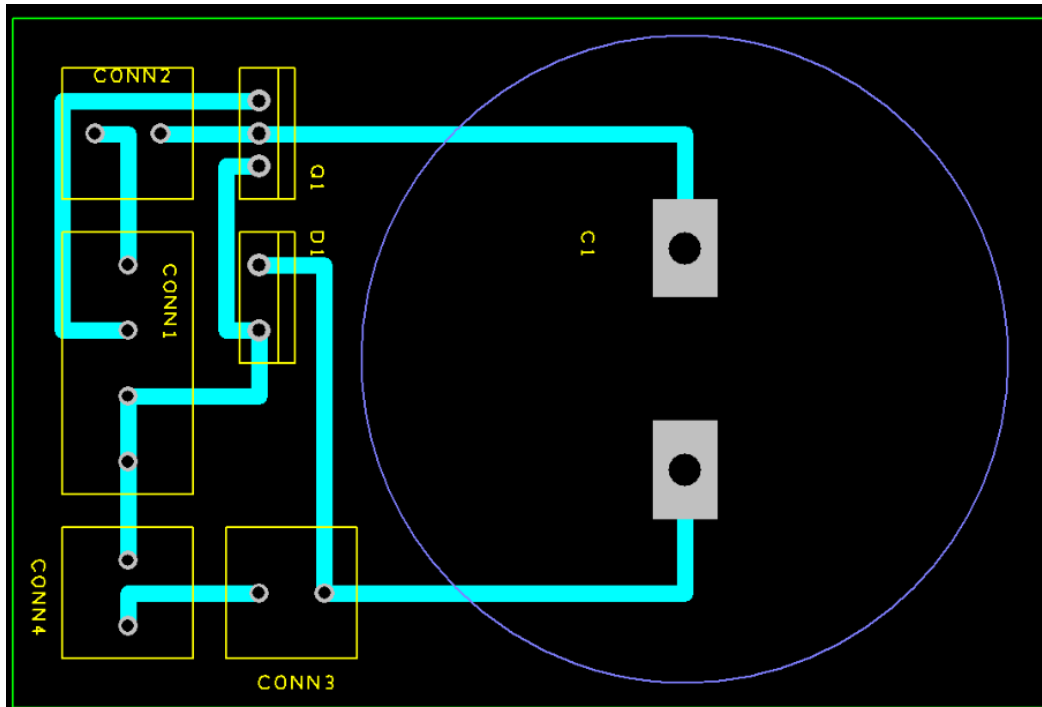


Figura 37 - Circuito impresso no software *DesignSpark*

Após o projeto do esquemático e do circuito impresso da placa pelo uso do software *DesignSpark*, o layout criado será impresso e através de um processo térmico, transferido para uma placa de fenolite. Posteriormente, com o desenho já na placa de fenolite, esta será banhada em uma solução de percloro de ferro e água com o intuito de corroer a parte de cobre da placa onde não será utilizada como trilha. Ferramentas como furador, lixas, alicates, ferro de solda e estanho são utilizados para soldar os componentes e confeccionar a placa.

7.3. CIRCUITO DE COMANDO

Para geração de sinal PWM (*pulse-width modulation*), foi utilizado como modulador de largura de pulso o CI SG3524 da *Texas Instruments*.

	PIN		TYPE	DESCRIPTION
	NAME	NO.		
	COL 1	12	O	Collector terminal of BJT output 1
	COL 2	13	O	Collector terminal of BJT output 2
	COMP	9	I/O	Error amplifier compensation pin
	CT	7	—	Capacitor terminal used to set oscillator frequency
	CURR LIM+	4	I	Positive current limiting amplifier input
	CURR LIM-	5	I	Negative current limiting amplifier input
	EMIT 1	11	O	Emitter terminal of BJT output 1
	EMIT 2	14	O	Emitter terminal of BJT output 2
	GND	8	—	Ground
	IN+	2	I	Positive error amplifier input
	IN-	1	I	Negative error amplifier input
	OSC OUT	3	O	Oscillator Output
	REF OUT	16	O	Reference regulator output
	RT	6	—	Resistor terminal used to set oscillator frequency
	SHUTDOWN	10	I	Device shutdown
	Vcc	15	—	Positive supply

Figura 38 - Pinagem e funções do CI SG3524
Fonte: Texas Instruments (2015)

A Figura 39 representa o esquemático do circuito de comando feito no software PSIM®. O circuito é alimentado em 15V. As resistências R1, R2 e R3 são de 5,6KΩ, 5,6KΩ e 560Ω respectivamente. O potenciômetro usado para *setar* a razão cíclica é de 100KΩ e o capacitor C1 é de 10nF. O transistor Q1 é do tipo npn, mandando este sinal para o terminal *gate* (*G*) do *mosfet* que encontra-se no conversor.

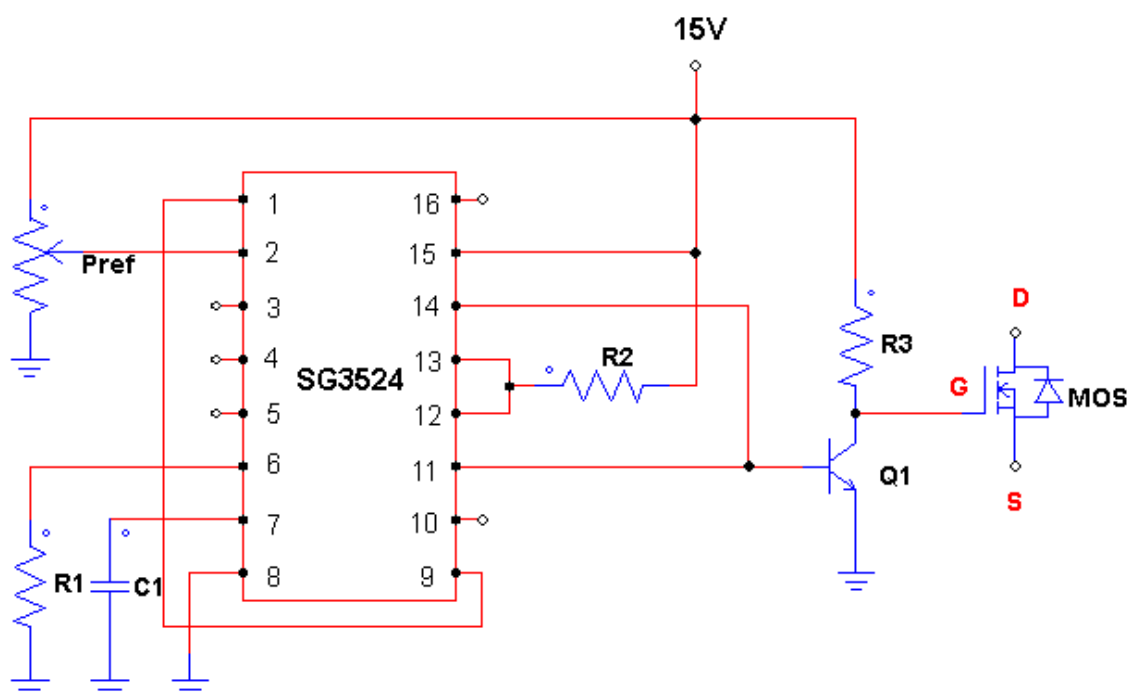


Figura 39 - Circuito de comando

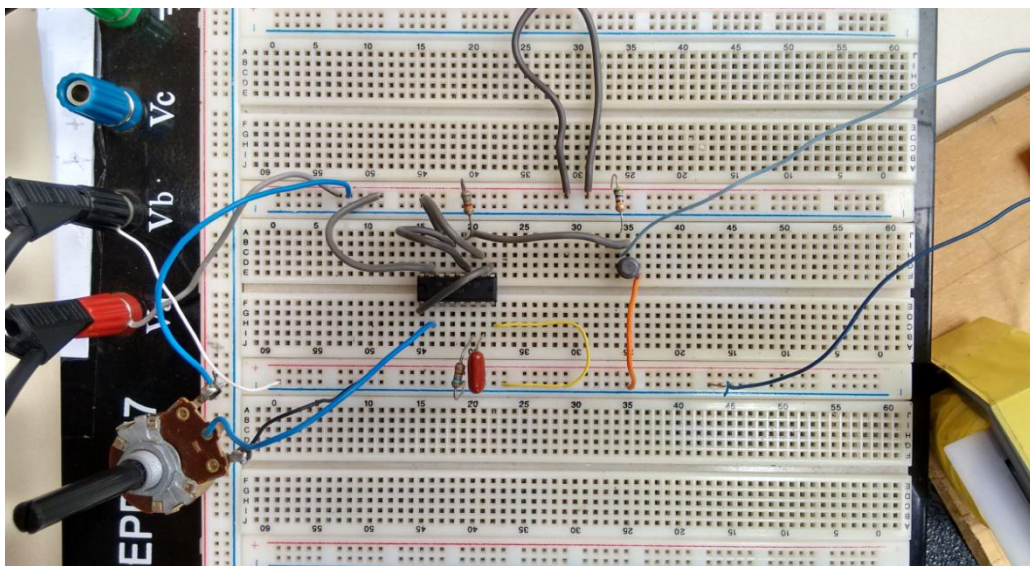


Figura 40 - Circuito de comando finalizado em *protoboard*

7.4. LISTA DE MATERIAIS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

- Bateria Estacionária Freedom Heliar DF2500, 12V/165Ah, chumbo/selada. Principais aplicações: sistemas fotovoltaicos, no-breaks, telecomunicações.
- Fonte CC Regulável (tensão / corrente)
- Multímetro Digital
- Osciloscópio Digital Tektronix DPO 3014
- Ponteira de corrente
- Conversor *Cúk*
- PV (especificações Figura 41)

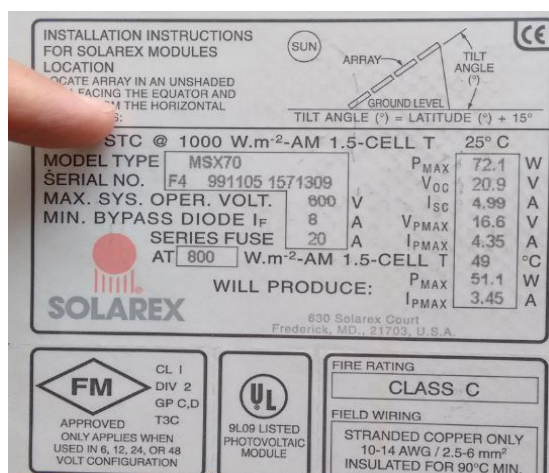


Figura 41 - Especificações técnicas do PV utilizado no projeto

7.5. TESTES DO CONVERSOR E CIRCUITO DE COMANDO (BANCADA LABORATÓRIO)

Em laboratório foram realizados os testes do conversor e do circuito de comando para averiguar seu correto funcionamento e desempenho de acordo com o que fora projetado e simulado.

Parte da fonte foi ajustada em 15V para alimentar o circuito de comando e uma resistência de 100 Ω para aplicações de alta potência foi usada para simular a carga. Conectou-se o sinal do circuito de comando no terminal gate do transistor, ajustando-se a razão cíclica pelo potenciômetro até atingir a tensão desejada na carga (12,5V). A outra saída da fonte foi ajustada em 16,7V na entrada do conversor para simular o PV. A Figura 42 mostra o sinal advindo do circuito de comando nesta etapa:

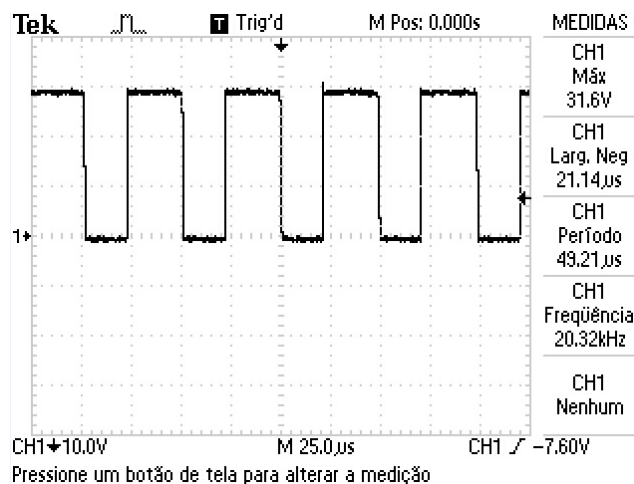


Figura 42: Sinal do circuito de comando

Período = 49,21 μ s

Largura negativa (tempo de chave fechada) = 21,14 μ s

Razão Cíclica = Largura negativa / Período

$$D = \frac{21,14}{49,21} = 0,4295$$

Os resultados obtidos foram excelentes pois para uma tensão na carga de 12,5V e uma tensão de entrada ajustada para 16,7V (diferença de apenas 0,1V do que fora projetado para ser 16,6V), obteve-se uma razão cíclica de exatos 0,4295, valor igual ao projetado e simulado.

A Figura 43 mostra que não há altos picos de tensão no chaveamento do transistor, sendo esta uma vantagem, na qual a topologia do conversor *Cúk* mostrou ser alto-grampeado.

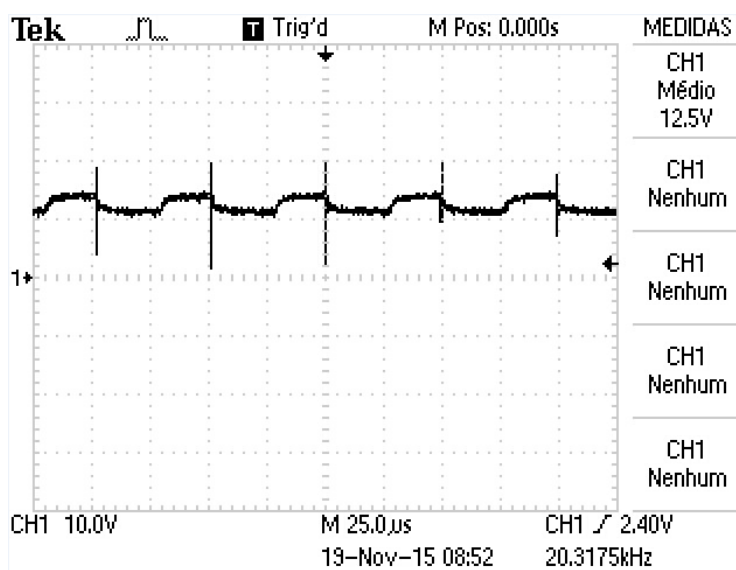


Figura 43: Tensão no transistor

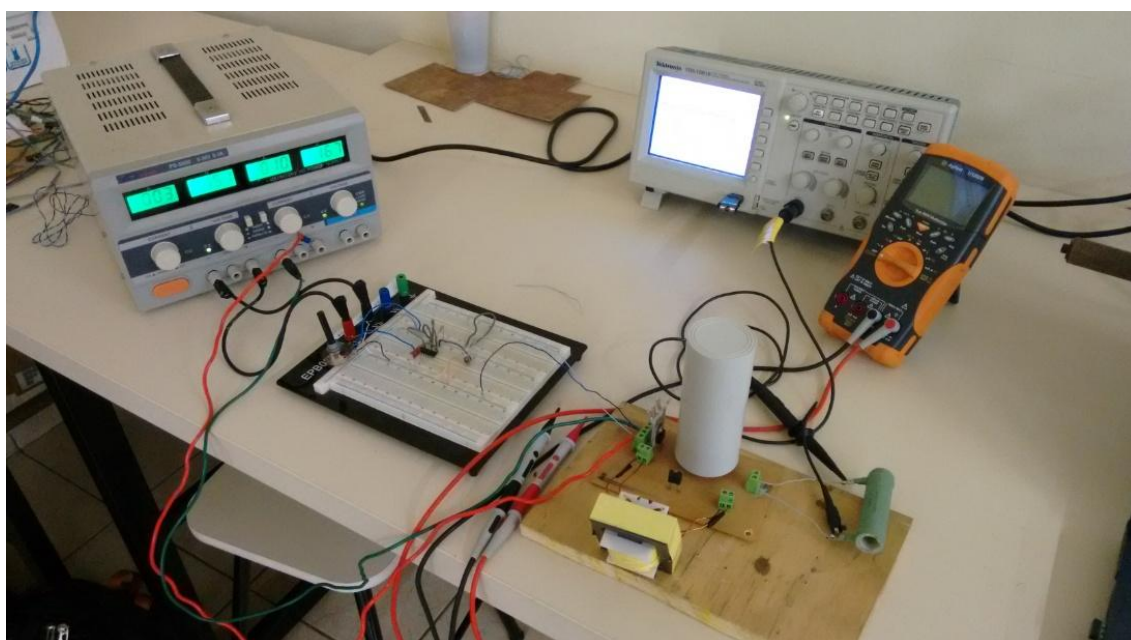


Figura 44: Teste do circuito de comando e do conversor conectado à uma carga

A Figura 45 mostra o teste realizado com osciloscópio para verificação dos pontos dos indutores acoplados na qual as ondas estão em fase, indicando assertividade na acoplagem dos mesmos.

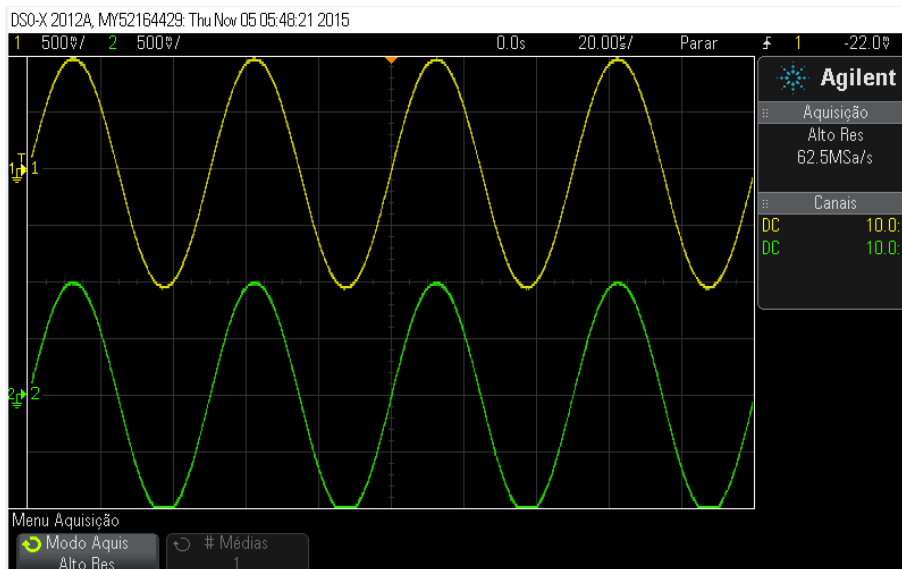


Figura 45: Teste para verificação dos pontos dos indutores acoplados

Para a medição do valor das indutâncias acopladas, foi usada a Ponte LCR-819, contudo, não foi possível obter as medições devido à problemas no aparelho do laboratório, variando entre 3mH e 0,06mH. O valor esperado seria de 0,8mH, ou seja, a metade do valor da indutância dos indutores acoplados (1,6mH).

7.6. TESTES REALIZADOS DO SISTEMA COMPLETO (PV + CONVERTOR + BATERIA/CARGA)

As medições foram realizadas conforme as condições atmosféricas do dia, por volta de 12:00 PM (horário de verão), céu parcialmente nublado e com variações na intensidade de incidência solar em determinados momentos do teste.

A razão cíclica que otimizou o fornecimento de energia para a bateria foi de 0,58. Acima desse valor a maior quantidade de corrente demandada da placa não é entregue à bateria.

1) Corrente na bateria (I_{out})

a) Sem zoom (Figura 46): $I_{out} = 1,392A$.

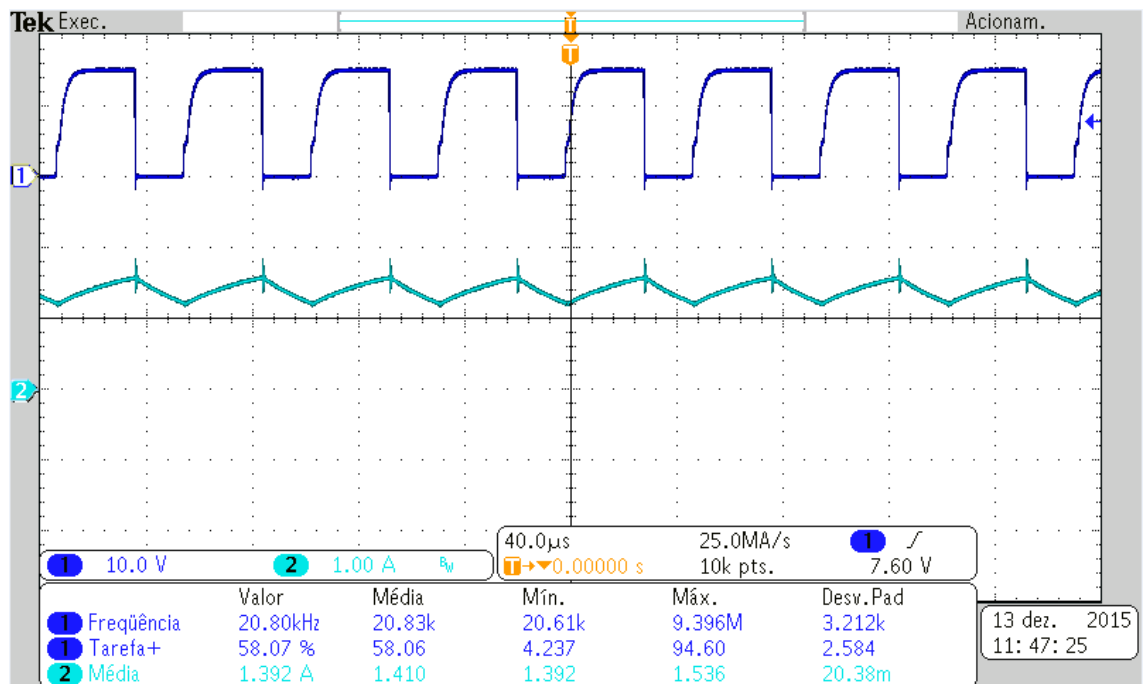


Figura 46: Corrente de saída (I_{out})

b) Com zoom (Figura 47): ondulação sob a forma de onda da tensão de gatilho do mosfet em 4 períodos de chaveamento.

Como a corrente esta em 20mA por divisão, tem-se aproximadamente 360mA de ondulação. A variação de corrente é:

$$\Delta I_{out} = \frac{\text{ondulação (mA)}}{I_{in\ med} (A)} = \frac{360mA}{1,392A} (x100) = 25,86\%$$

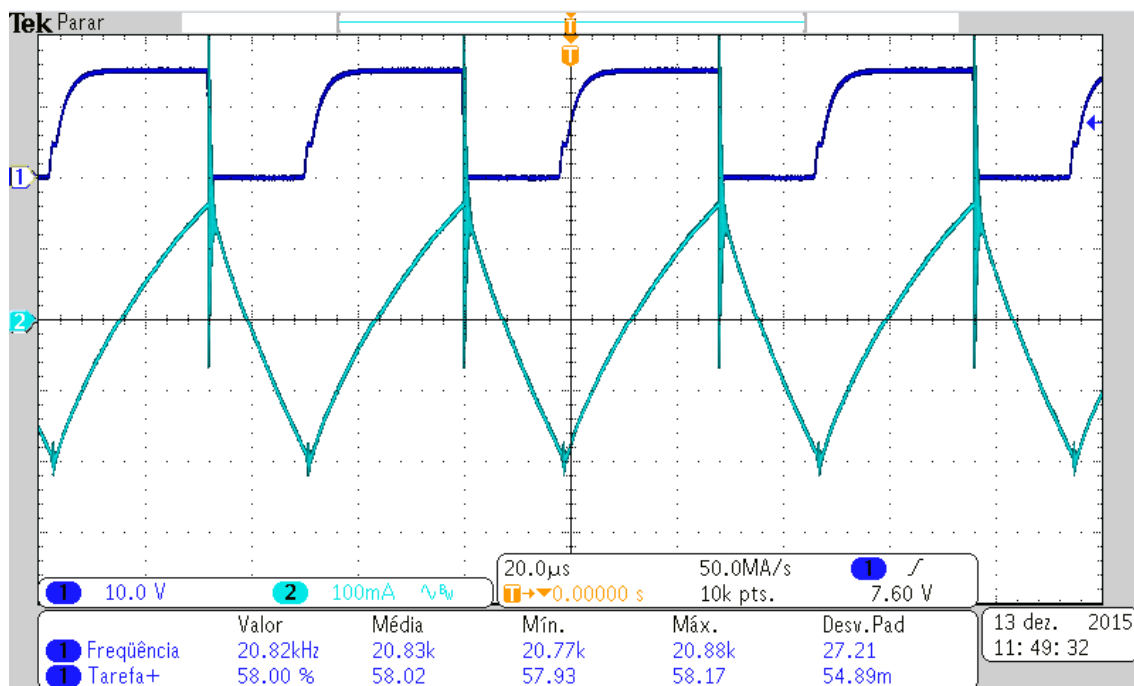


Figura 47: Ondulação da corrente de saída (I_{out})

2) Tensão na bateria realizada com multímetro: $V_{out} = 12,7V$.

3) Tensão no capacitor

a) Sem zoom (Figura 48): $V_{C_{med}} = 28,53V$.

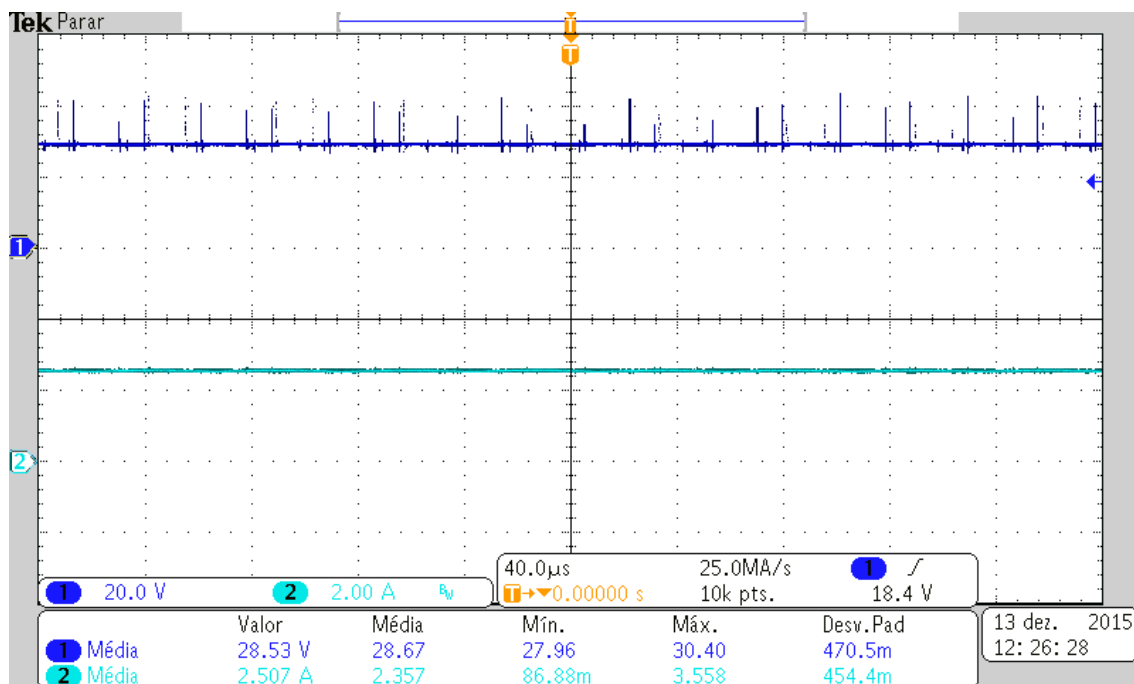


Figura 48: Tensão no capacitor

b) Com zoom (Figura 49):

Como a tensão está em 100mV por divisão, tem-se aproximadamente 3100mV de ondulação. A variação de tensão é:

$$\Delta V_c = \frac{\text{ondulação (mV)}}{V_{C\text{ med}} (V)} = \frac{3100\text{mV}}{28,53\text{V}} (\times 100) = 10,52\%$$

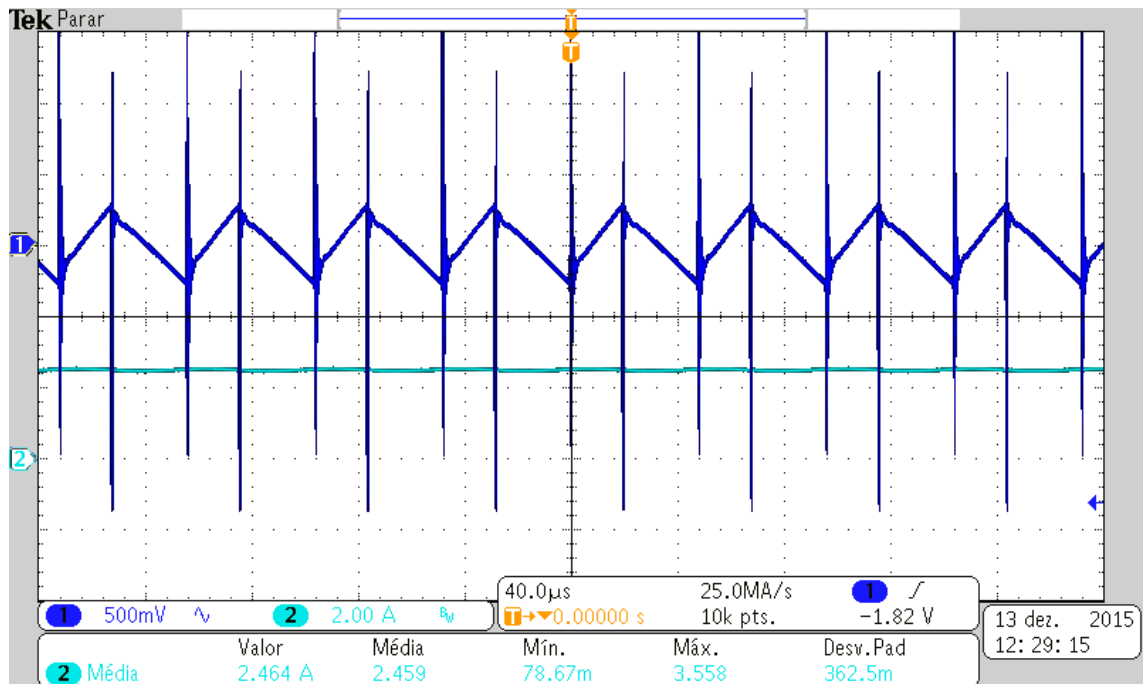


Figura 49: Ondulação da tensão no capacitor

4) Tensão no transistor (Figura 50): 48,21V.

A Figura 50 mostra a tensão na chave e corrente na placa com destaque para o pico de tensão na chave. Foi usado $D = 0,42$ (tarefa) pois como a tensão na chave é complementar ao pulso de comando, a razão cíclica também será complementar ao 0,58.

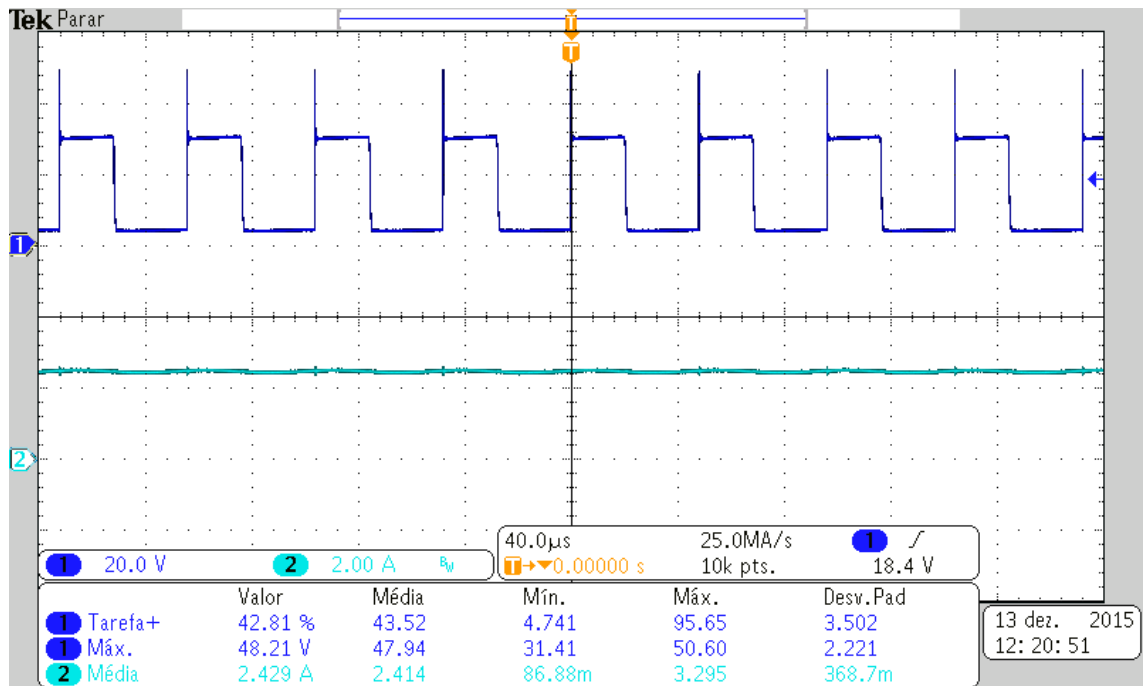
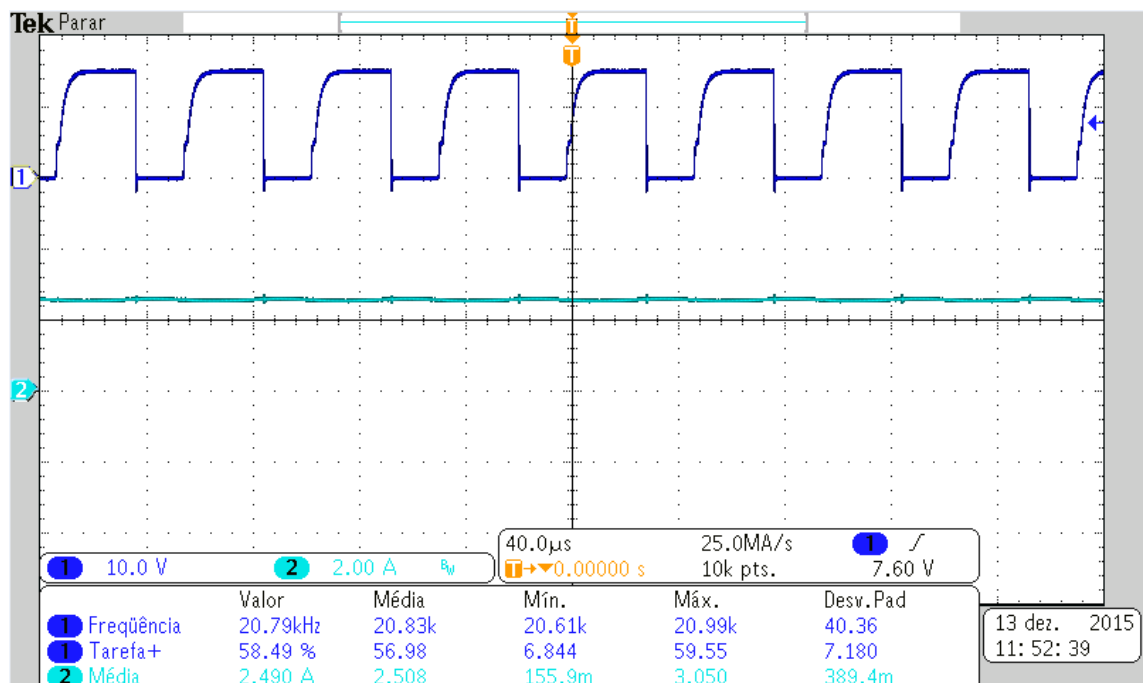


Figura 50: Tensão no transistor

5) Corrente na entrada (I_{in})a) Sem zoom (Figura 51): $I_{in} = 2,490A$ Figura 51: Corrente na entrada (I_{in})

b) Com zoom (Figura 52): ondulação sob a forma de onda da tensão de gatilho do mosfet.

Como a corrente está em 4mA por divisão, tem-se aproximadamente 60mA de ondulação. A variação de corrente é:

$$\Delta I_{in} = \frac{\text{ondulação (mA)}}{I_{in \text{ med}} \text{ (A)}} = \frac{60 \text{ mA}}{2,490 \text{ A}} (\times 100) = 2,40\%$$

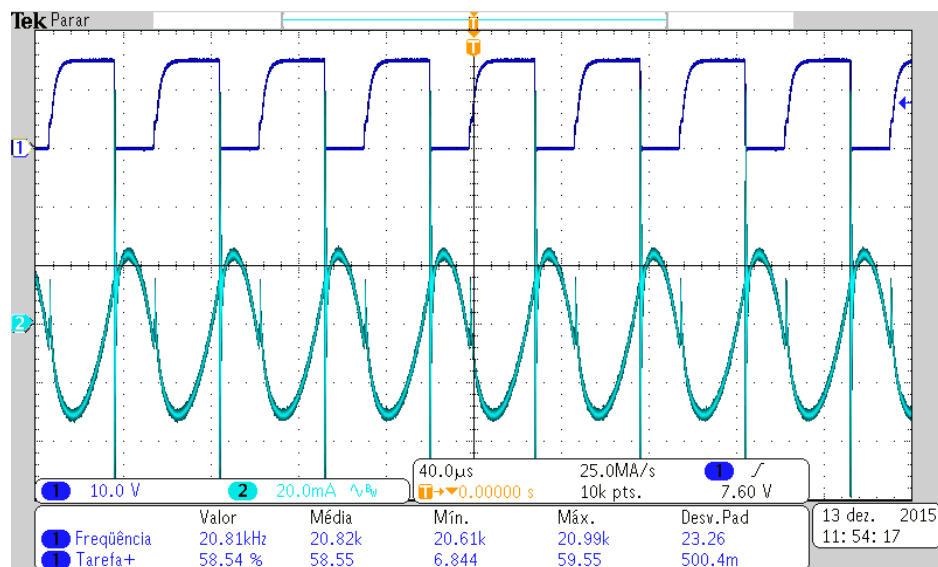


Figura 52: Ondulação da corrente na entrada (I_{in})

6) Tensão na entrada (Figura 53): $V_{in} = 13,95\text{V}$.

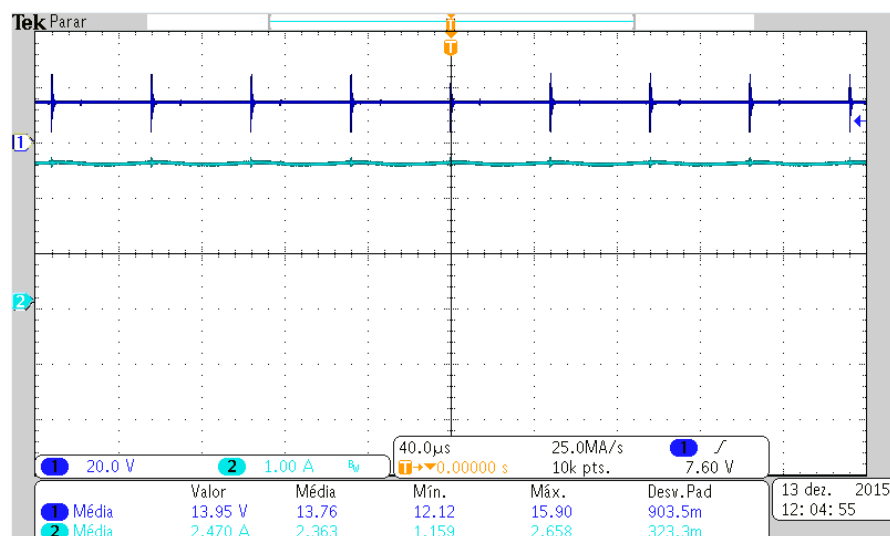


Figura 53: Tensão na entrada (terminais do painel fotovoltaico)

7) Tensão no diodo (Figura 54): 25,76V.

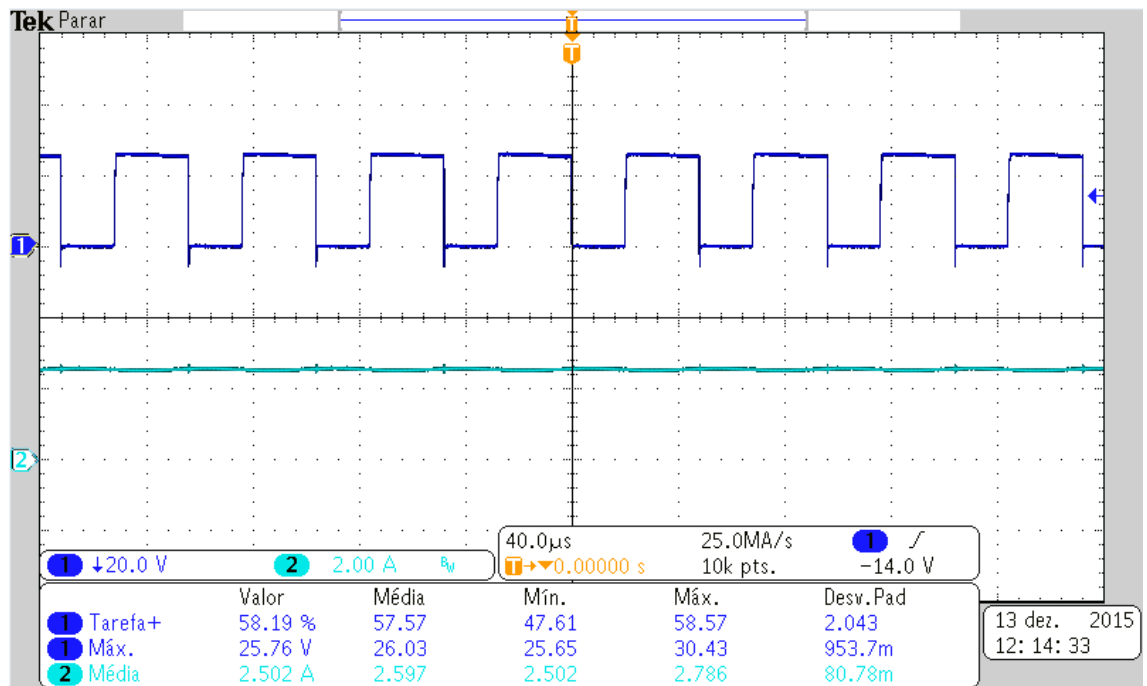


Figura 54: Tensão no diodo

8) Rendimento (η)

a) Potência máxima de saída (Figura 55): 17,56W.

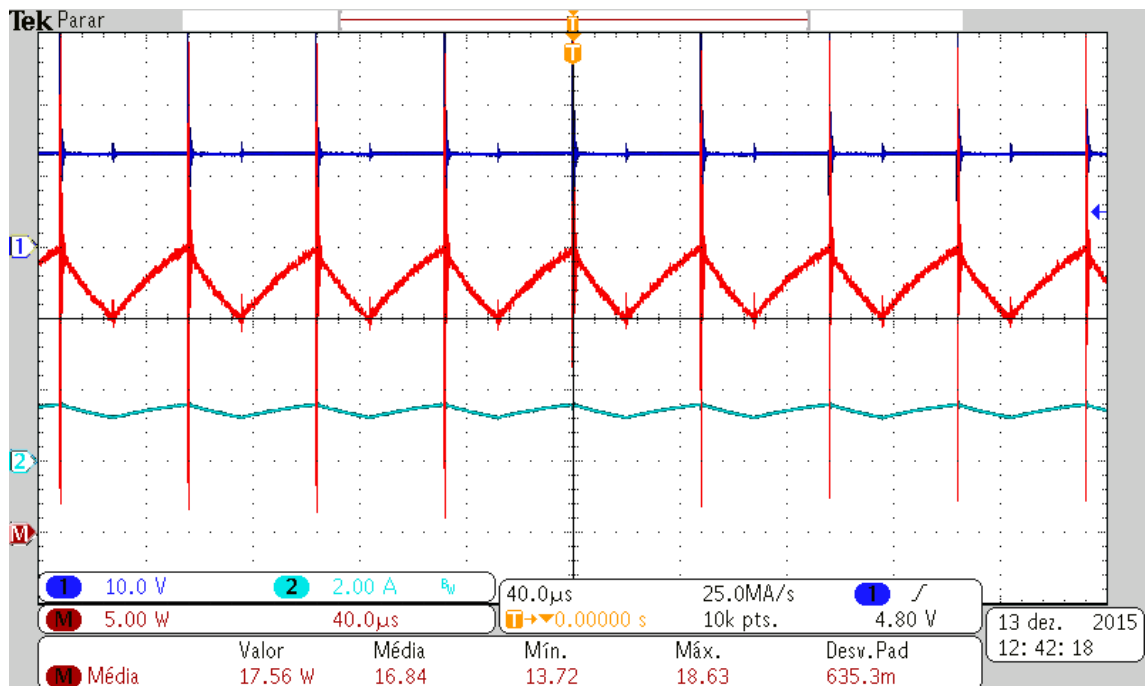


Figura 55: Potência máxima de saída

b) Potência máxima de entrada (Figura 56): 32,15W.

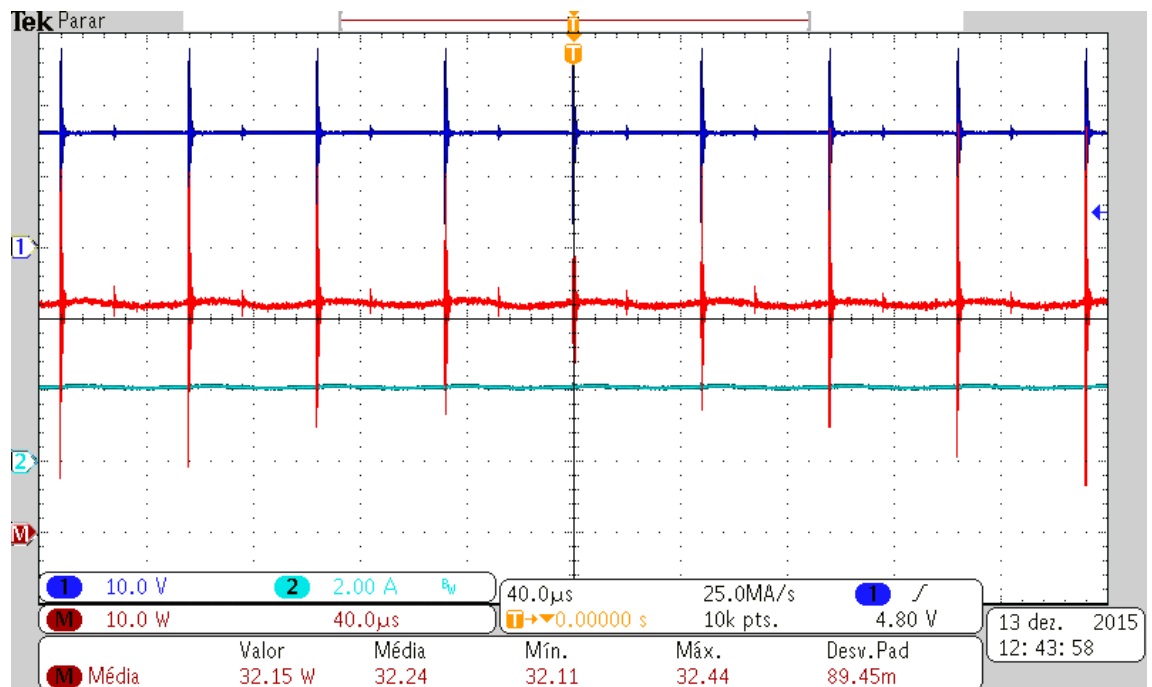


Figura 56: Potência máxima de entrada

Como as medições de potência de entrada e saída foram feitas sob as mesmas condições, tem-se o rendimento (η) para o teste prático com o sistema completo:

$$\eta = \frac{P_{\text{máx Saída}}}{P_{\text{máx Entrada}}} = \frac{17,56}{32,15} (\times 100) = 54\%$$



Figura 57: Testes do sistema completo (1)

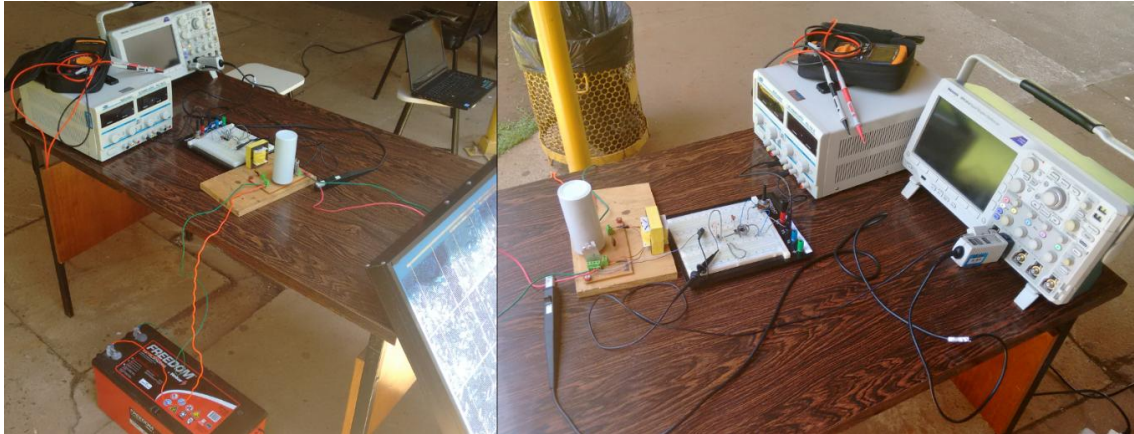


Figura 58: Testes do sistema completo (2)

7.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pode-se observar que houve a necessidade de aumentar a razão cíclica que estava estipulada no projeto de 0,42 para 0,58, onde com esse aumento o fornecimento de energia foi otimizado. A corrente de saída também diminuiu com o que fora projetado, havendo também um aumento na ondulação da mesma. Para a tensão de saída obteve-se o valor estimado de tensão na bateria. A tensão média no capacitor mostrou-se ser bem fiel com relação ao projetado, com um pouco mais de ondulação apenas.

Com relação ao transistor, não há altos picos de tensão no chaveamento do mesmo, sendo esta uma vantagem na qual a topologia do conversor *Cúk* mostrou ser alto-grampeado. A corrente de entrada diminuiu comparado ao projetado, contudo apresentou ótimos resultados abaixo dos 2,5% de ondulação apresentados na simulação. Isso mostra que o acoplamento ajudou em muito a reduzir a ondulação da corrente de entrada, porém a corrente de saída apresentou grande variação. A tensão de entrada prevista diminuiu um pouco devido às condições climáticas, mas apresentou um bom valor de aproximadamente 14V. Uma das perdas que envolveram na aplicação foi com relação aos indutores. Estes apresentam cerca de 13,7W de perdas apenas pela resistência do fio de cobre, afetando parte do rendimento. No entanto, ainda um rendimento aceitável para este tipo de aplicação fotovoltaica nas condições vigentes.

8. CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos traçados e todo conhecimento agregado, considera-se que o trabalho foi bastante proveitoso do ponto de vista acadêmico e profissional na formação de um Engenheiro Eletrônico, onde houve a possibilidade de trabalhar com diversos campos do conhecimento e sub-áreas da Engenharia Elétrica como Eletrônica de Potência, Controle, Eletrônica Digital e Analógica, Eficiência Energética, Análise de Circuitos, Computação, dentre outros.

O foco principal foi na área de Eletrônica de Potência através da elaboração e projeto do conversor. As simulações por *software* foram quase idênticas ao projeto e ao equacionamento matemático, apresentando também ótimos resultados práticos quando testado em laboratório. Um ponto negativo foi com relação à corrente de saída que foi mais baixa do que o esperado, sendo o maior problema a alta ondulação que esta apresentou. Talvez mudando-se a maneira de enrolar e refazendo os indutores esse problema seja sanado ou reduzido.

O rendimento na aplicação do sistema completo quando comparado a outras fontes de energias não é tão expressivo. Contudo, para fontes fotovoltaicas e para tal aplicabilidade (sistema remoto), mostrou-se ser perfeitamente adequado pois o painel recebe energia infinita, mantém a bateria carregada e a mesma alimenta a carga. Ou seja, é diferente ter perdas de uma fonte infinita (energia solar) comparado às perdas térmicas de um motor, por exemplo, na qual este está gastando energia elétrica e conseqüentemente gerando gastos financeiros por estar conectado à rede elétrica de distribuição.

Outro ponto positivo foi poder ter unificado um maior aprendizado em Eletrônica de Potência com aplicações em energias renováveis, especialmente a fotovoltaica, pois precisou-se pesquisar e aprender em muito tal aplicabilidade. Sendo assim, este trabalho foi de grande importância para agregar conhecimento prático e teórico, onde uniu estes dois quesitos para um melhor entendimento e visão de diversos tópicos e assuntos estudados por toda graduação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª edição. Brasília, 2008, 159 p.

ALVES, MARCOS GUTIERREZ. **Mini-inversores para aproveitamento de energia fotovoltaica, com técnicas de MPPT, sincronismo e conexão com a rede de CA em BT, proteção de ilhamento, gerenciamento da energia e da operação**. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2013.

ATLAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL. 1998 (ADAPTADO). **Radiação global diária – média anual típica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3.htm>. Acesso em: 26 nov. 2013.

BARBI, IVO; MARTINS, DENIZAR CRUZ. **Eletrônica de Potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2000, 377 p.

BODRA, WALTER. **Energia solar tem inúmeras aplicações**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,energia-solar-tem-inumeras-aplicacoes,741182,0.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

BRITO, M. A. G. de; GALOTTO JUNIOR, L.; SAMPAIO, L. P.; MELO, G. de A.; CANESIN, C. A. **Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Piscataway, v. 60, n. 3, p. 1156-1167, 2013.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Weather Station GRWS100**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com/grws100>>. Acesso em: 15 set. 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. **Energia solar**. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Paginas/energia_solar.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2013.

ELTAWIL, MOHAMED A; ZHAO, ZHENGMING. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Beijing: Tsinghua University, 2010, 18 p.

ERICKSON, ROBERT WARREN; MAKSIMOVIC, DRAGAN. **Fundamentals of Power Electronics**. 2ª edição. Colorado (EUA), KAP, 2004, 883 p.

FONT, CARLOS HENRIQUE ILLA. **Conversores CC-CC Não Isolados**. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/illafont/?id=2>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

INSTITUTO SUL-AMERICANO DE POLÍTICA E ESTRATÉGIA (ISAPE). **Oferta de energia**. Disponível em: <<http://isape.wordpress.com/2011/09/29/oferta-de-energia-precisa-crescer-cerca-de-5-ao-ano-diz-secretario-de-desenvolvimento-energetico/>>. Acesso em: 22 nov. 2013.

HAYAMA. **Carregadores**. Disponível em: <http://www.hayama.com.br/index.php/produtos/listar_categoria_detalhes/8/0>. Acesso em: 09 set 2015.

KYOCERA DO BRASIL. **Módulos solares**. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br>>. Acesso em: 02 dez. 2013.

MARTINS, ANTÓNIO PEDRO DA MOTA; RODRIGUES, RICARDO JOSÉ DA SILVA. **Sistema de alimentação a energia solar - SAESOL**. 66 p. Projeto/Seminário/Trabalho Final de Curso (Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade do Porto - Portugal, 2002.

MATTOS, FILIPE C.; et al. **Contribuição ao estudo de um sistema solar fotovoltaico monofásico de único estágio**. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juíz de Fora - MG, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha energética brasileira – Exercício de 2012**. Brasília, 2013, 25 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia Solar no Brasil e no Mundo**. Referência 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/item/127>>. Acesso em: 22 nov. 2013.

MÍREZ, JORGE. **Curvas genéricas de corriente y voltaje en células solares**. Disponível em: < <https://jmirez.wordpress.com/tag/energias-renovables/> >. Acesso em: 14 out. 2015.

NEOSOLAR ENERGIA. **Baterias Estacionárias**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/baterias-estacionarias>>. Acesso em: 05 set. 2015.

NEOSOLAR ENERGIA. **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: < <http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica> >. Acesso em: 04 dez. 2013.

NIFE SISTEMAS ELÉTRICOS. **Esclarecimentos técnicos sobre a utilização de baterias estacionárias em ambientes sem temperatura controlada**. São Paulo - SP, 2015.

PATTERSON, DEAN J. **Renewable Energy Engineering – Sustainable Energy Engineering**. Brazilian Power Electronics Conference, Bonito (MS), 2009, p 6.

PORTAL SOLAR. **A melhor direção do painel solar fotovoltaico.** Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **Potencial brasileiro da geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica: análise de paridade de rede.** In: ENCONTRO NACIONAL, 9, LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, ENCAC, 5, 2007, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: UFOP, 2007. 10 p.

SAMPAIO, LEONARDO POLTRONIERI. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de geração distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade.** 209 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2013.

SAMPAIO, LEONARDO POLTRONIERI. **Uma nova metodologia de projeto e controle para o inversor Boost (CSI) monofásico, para o aproveitamento de fontes alternativas de energia elétrica.** 110 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2010.

SANTOS, GUILHERME VIANNA. **Modelagem do conversor Cúk.** Disponível em: <<http://eletronicaemcasa.blogspot.com.br/2014/05/modelagem-do-conversor-cuk.html>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

SIMAS, EDUARDO. **Conversores de Corrente Contínua para Corrente Contínua – Topologias Clássicas.** Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Elétrica. Disciplina de Eletrônica de Potência. 2015.

TELECO. **Energia DC: Tensão de flutuação e de carga.** Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbateria/pagina_4.asp>. Acesso em: 08 set. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS. **Data Sheet SG3524.** 2015.

UNICOBA. **Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula.** Manual Técnico - Unipower Série UP. 2015.

XIAO, LI. **Cuk Topology: Little-Known but still highly interesting.** Seekic - Global IC Trading Plataforma. 2011.

ZONG, XIANGDONG. **A single Phase Grid Connected DC/AC Inverter with Reactive Power Control for Residential PV Application.** 2011. 76 p. Tese (Mestre em Ciência Aplicada) – Departamento de graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Toronto (Canadá).