

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

CAIO CESAR WEINERT

**APLICAÇÃO DO CONVERSOR CC-CC TOPOLOGIA CUK PARA O  
CARREGAMENTO DE BATERIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA, PR

2017

CAIO CESAR WEINERT

**APLICAÇÃO DO CONVERSOR CC-CC TOPOLOGIA CUK PARA O  
CARREGAMENTO DE BATERIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Márcio Mendes Casaro.

PONTA GROSSA, PR

2017



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### O USO DA ENERGIA SOLAR PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS ATRAVES DO CONVERSOR CC-CC CUK

Desenvolvido por:

Caio Cesar Weinert

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 17 de março de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em automação industrial. Os candidatos foram arguidos pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Dr. Márcio Mendes Casaro  
Professor Orientador

---

Dr. Frederic Conrad Janzen  
Membro titular

---

Msc. Robson Moreira de Oliveira  
Membro titular

## RESUMO

Este trabalho propõe a utilização do conversor CC-CC Cuk no carregamento de uma bateria estacionária através de painéis fotovoltaicos. A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho é disponibilizar a energia produzida para aplicações remotas, ou seja, atender a demanda de cargas específicas em locais não atendidos pela rede de distribuição comercial, bem como demonstrar a viabilidade do conversor Cuk para a aplicação fotovoltaica. O conversor opera com uma malha de tensão do tipo on-off com histerese. Emprega-se uma técnica de acoplamento entre os indutores de filtro de entrada e de saída do conversor Cuk, o que leva a uma significativa compactação da estrutura. Os pulsos de comando PWM são gerados pelos circuitos SG3524 e SG3525 para fins de comparação dos rendimentos obtidos. A questão do rendimento é o foco da pesquisa. Busca-se individualizar as perdas entre os componentes da topologia construída, a fim de minimizá-la. São apresentados resultados de simulação e alguns resultados práticos, dentre os quais se identifica a viabilidade do conversor, a funcionalidade da malha de controle e o ganho de velocidade nos tempos de subida e descida com o SG3525.

**Palavras-chave:** Conversor CC-CC Cuk. Energia solar fotovoltaica. Malha de controle de tensão. Aplicação remota.

## ABSTRACT

This work proposes the use of the DC-DC Cuk converter feeding a stationary battery through photovoltaic panels. The main motivation for the development of this work is to provide the energy produced for remote applications, that is, meet the demands of specific loads in places not served by commercial grid, as well as demonstrate the viability of Cuk converter for photovoltaic application. The converter operates with an on-off closed-loop control of voltage with hysteresis. It is used a coupling technique between input and output inductors filters of the Cuk converter, which leads to a significant compression of the structure. The PWM pulses are generated by SG3524 and SG3525 circuits for comparison of results. The efficiency is the focus of this research. Seeks to individualize the loss between the components of the constructed topology in order to minimize it. Simulation and some practical results are presented, among which identifies the converter viability, and functionality of the control loop and the speed improvement in the rise and fall times with the SG3525.

**Keywords:** DC-DC Cuk converter. Photovoltaic solar energy. Voltage control loop. Remote application.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de eletricidade por classe (%).....	10
Figura 2 – Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil, 2010.....	12
Figura3 - Radiação global diária – média anual típica.....	14
Figura 4 - Painel solar típico de 250W – Sunenergy (dim: 1662 x 990 x 46 mm) .....	19
Figura 5 - Eficiência de painéis solares.....	20
Figura 6 - Esquema de um sistema não conectado à rede ( <i>off-grid</i> ) .....	21
Figura 7 - Esquema de um sistema conectado à rede ( <i>grid-tie</i> ) .....	22
Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.....	22
Figura 9 - Curva corrente/tensão para valores $r_p$ e $r_s$ .....	23
Figura 10 - Amostra de pulsos PWM.....	24
Figura 11 - Representação da modulação PWM.....	25
Figura 12 - Princípio de funcionamento do comparador com histerese.....	28
Figura 13 - Representação comparador com histerese.....	29
Figura 14 - Método de associação de vários PVs com apenas um conversor.....	30
Figura 15 - Configuração em <i>string</i> para conversores e placas solares.....	30
Figura 16 - Topologia do conversor CC-CC boost.....	32
Figura 17 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor <i>Buck</i> .....	34
Figura 18 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor <i>Buck</i> .....	34
Figura 19 – Topologia conversor <i>Cuk</i> .....	35
Figura 20 - Circuito <i>Cuk</i> com chave fechada.....	35
Figura 21 - Circuito <i>Cuk</i> com chave aberta.....	36
Figura 22 - Circuito de potência real do conversor <i>Cuk</i> .....	37
Figura 23 - Formas de onda para regime permanente ( <i>Cuk</i> ) .....	38
Figura 24 - Estação meteorológica GRWS100 <i>Campbell Scientific</i> .....	40
Figura 25 - Estrutura do sistema.....	41
Figura 26 - Funcionamento do sistema.....	41
Figura 27 - Exemplificação do D constante na técnica MPPT.....	42
Figura 28 - Esquemático do conversor <i>Cuk</i> para simulações no PSIM®.....	45
Figura 29 - Corrente de entrada (L1), corrente de saída (L2) .....	46
Figura 30 - Tensão sob o capacitor (VC) e pulso de controle (Vg) .....	47
Figura 31 - Esquemático do conversor <i>Cuk</i> com indutores acoplados.....	48
Figura 32 - Esquemático da simulação do comparador com histerese.....	49
Figura 33 - Simulação comparador com histerese.....	50

Figura 34 - Simulação comparador com histerese de baixo para alto.....	50
Figura 35 - Simulação comparador com histerese de alto para baixo.....	51
Figura 36 - Representação dos indutores acoplados magneticamente.....	51
Figura 37 - Esquemático do circuito desenhado no software <i>DesignSpark</i> .....	52
Figura 38 - Circuito impresso no software <i>DesignSpark</i> .....	53
Figura 39 - Pinagem do CI SG3525.....	53
Figura 40 - Pulsos do CI SG3524.....	54
Figura 41 - Pulsos do CI SG3525.....	54
Figura 42 - Circuito da malha de tensão.....	56
Figura 43 - Circuito de comando finalizado em <i>protoboard</i> .....	56
Figura 44 - Teste para comprovar o alto grampeamento do conversor Cuk.....	57
Figura 45 - Teste para comprovar a funcionalidade do circuito e retirar resultados....	58
Figura 46 - Sinal do circuito de comando.....	59
Figura 47 - Teste do circuito de comando e do conversor conectado a uma carga....	61
Figura 48- Teste do circuito de comando e do conversor conectado à uma carga....	61
Figura 49- Teste resistência capacitor do conversor Cuk.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de simulação.....	46
Tabela 2 - Resultados de simulação.....	47
Tabela 3 - Resultados de simulação.....	48
Tabela 4 - Resultado teste prático com $D=0,42$ .....	59
Tabela 5 - Resultado teste prático com $D=0,48$ .....	60
Tabela 6 - Resultado teste prático com $D=0,54$ .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS

BT - Baixa tensão.  
 AT - Alta tensão.  
 CA - Corrente alternada  
 CC - Corrente contínua  
 DDP - Diferencial de potencial  
 GD - Geração distribuída  
 I<sub>ph</sub> - Fotocorrente

Ir - Corrente de saturação reversa da célula  
Rp - Resistência paralela da célula  
Rs - Resistência série  
Vef - Tensão eficaz  
Vg - Tensão pulso de controle  
Vc – Tensão no capacitor  
Ci – Circuito integrado  
nf – NanoFarad

## LISTA DE SÍMBOLOS

C - Capacitor  
D – Diodo  
D– Razão cíclica  
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  
V - Tensão  
Vo - Tensão de saída  
 $\eta$  - Fator de qualidade da junção pn  
 $\eta$  - Rendimento  
 $\Delta$  - 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

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1. PROBLEMA .....	16
1.2. OBJETIVOS .....	16
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.3. JUSTIFICATIVA .....	17
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	<b>18</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
3.1. ENERGIA SOLAR .....	18
3.2. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO .....	19
3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	21
3.4. PARÂMETROS DO PAINEL FOTOVOLTAICO .....	23
3.5. MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO – PWM. ....	24
3.6. BATERIAS E CARREGADORES .....	25
3.6.1. TENSÃO DE FLUTUAÇÃO .....	26
3.6.2. CARREGADORES .....	27
3.7. COMPARADOR COM HISTERESE.....	28
3.8. ESTÁGIOS DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS.....	29
3.8.1. ESTÁGIOS ELEVADORES.....	29
3.9. CONVERSORES.....	31
3.9.1. CONVERSOR CC-CC BOOST CLÁSSICO.....	31
3.9.2. CONVERSOR BUCK.....	33
3.9.3. CONVERSOR CUK.....	34
<b>4. SISTEMA IMPLEMENTADO</b> .....	<b>39</b>
<b>5. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO CONVERSOR CUK</b> .....	<b>42</b>
<b>6. PROJETO DO CONVERSOR</b> .....	<b>45</b>
6. 1.PROJETO COMPARADOR COM HISTERESE.....	45
<b>7. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS REALIZADOS VIA SOFTWARE</b> .....	<b>45</b>
<b>8. PROJETO, TESTES E RESULTADOS PRÁTICOS</b> .....	<b>50</b>
8.1 PROJETO INDUTORES .....	55
8.2 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO .....	52
8.3 CIRCUITO DE COMANDO .....	53
8.4 LISTA DE MATERIAIS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES .....	57
8.5 TESTES DO CONVERSOR E CIRCUITO DE COMANDO (BANCADA LABORATÓRIO) .....	57
8.6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	62

<b>9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO.

Atualmente, a geração de energia elétrica possui relevante importância e está sendo alvo de constantes debates na esfera global. Isso ocorre devido ao amplo crescimento populacional, científico e tecnológico que vem ocorrendo e exige maior consumo dessa fonte de energia.

Embora exista uma demanda de consumo e de crescimento, é necessária a conscientização do ser humano para o uso de energias alternativas e renováveis, de forma a diminuir os impactos negativos que produzem ao meio ambiente, através de práticas racionais e responsáveis. Podemos verificar o desenvolvimento da economia bem como o grau de qualidade de vida da população em alguns países através da verificação do nível de uso de energia elétrica. Esta que é usualmente ligada a taxa de gasto energético do país. Segundo (EPE, 2015), o maior gasto de energia elétrica é no setor industrial, porém nos últimos anos o setor residencial se destaca pelo crescimento. Este se destaca pelo crescimento elevado do número de bens de serviço que utilizam da energia elétrica como fonte de funcionamento.

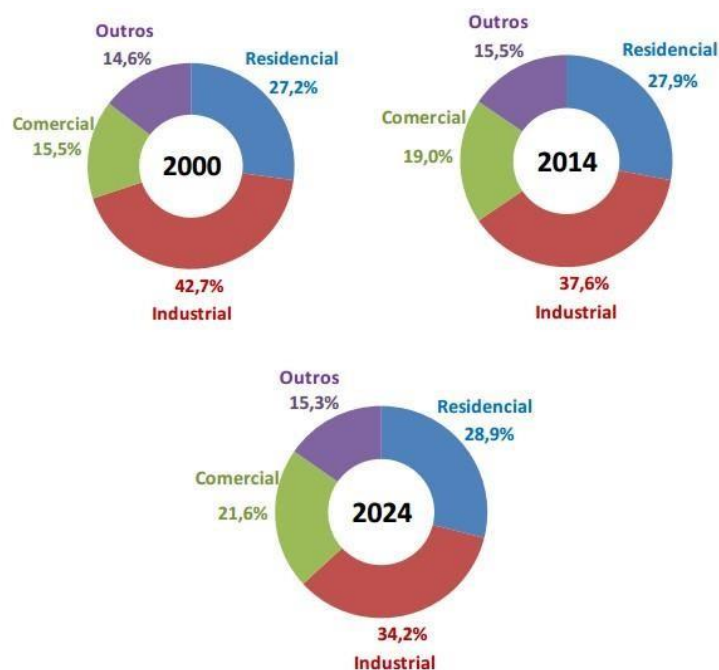


Figura 1- Consumo de eletricidade por classe (%).

Fonte: EPE, (2015).

Embora o uso desenfreado de energia cause um dano ambiental que repercute na própria sociedade, é extremamente necessário seu uso constante em uma área industrial, por exemplo, pois esta depende da fonte de energia para produção, e conseqüente o faturamento.

Assim, podemos comparar a energia como sendo sinônimo de desenvolvimento, ou seja, a sociedade depende da energia para viver, crescer e se aperfeiçoar. Como a energia ocupa um espaço tão importante no mundo contemporâneo, é de suma importância realizar estudos mais aprofundados sobre a sua geração, sendo necessário um maior preparo e planejamento de um projeto energético.

Uma das principais formas de exploração de energia não renovável está concentrada na queima de combustíveis fósseis. Além de ser um meio totalmente prejudicial ao meio ambiente, é uma fonte de energia esgotável, ou seja, seu uso constante e exagerado poderá ocasionar o seu fim e um grande prejuízo ao meio ambiente.

A fonte de energia mais utilizada no mundo é advinda das usinas hidrelétricas, termelétricas, geotérmicas e nucleares. De acordo com o Ministério de Minas Energia (MME), (2010), demonstrada na figura 2, o panorama no Brasil referente ao uso de fontes de energia renováveis alcança um patamar importante, ultrapassando os 75% de toda a produção nacional, índice animador comparado a outros países, porém quase a totalidade vem derivada de energia hidráulica, o que demonstra que o uso de outros métodos renováveis ainda não é comum no país.

A fonte de energia adquirida através das usinas hidrelétricas (fontes hidráulicas) é considerada fonte limpa, pois aproveita o movimento das águas de rios para seu funcionamento, porém, o ponto negativo está concentrado no impacto ambiental que causa em virtude de necessitar, para sua implantação, de um amplo espaço, vindo a destruir ecossistemas, alterando a paisagem natural e podendo até oferecer riscos de alagamentos, colocando em risco a própria sociedade.

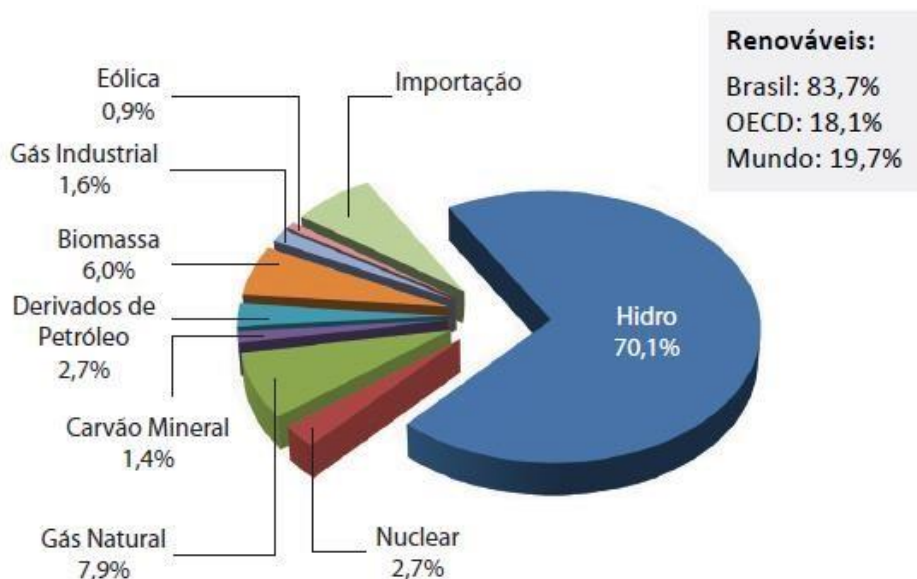


Figura 2 – Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil.

Fonte: MME (2013)

Diante dos fatos, torna-se necessário pluralizar as formas de exploração de energia com intuito de desestagnar a geração que atualmente está concentrada basicamente em uma única fonte.

Assim, embasado nesses argumentos, foram realizados estudos buscando apresentar alternativas para variação da produção de energia, utilizando a produção de energia solar através de um conversor e sua aplicação em locais remotos.

O principal ponto positivo no uso da energia solar é o fato de ser uma fonte renovável de energia, não causando impactos negativos ao meio ambiente. De acordo com a Companhia Elétrica de Minas Gerais – CEMIG (2013), o uso da energia solar tende a ser a solução para o problema de fornecimento de energia elétrica a locais afastados e de difícil acesso.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2013), a energia solar pode ser classificada de duas formas: Energia Térmica e Solar Fotovoltaica.

A energia térmica refere-se a coletores e concentradores usados para aquecer fluidos. Ressalto que, a utilização de coletores é benéfica, pois ocupa o lugar dos aquecedores normalmente utilizados, tais como: torneira elétrica e chuveiro elétrico. O que diferencia os concentradores para os coletores é que, no primeiro caso, este é aplicado quando a temperatura a ser atingida necessita ser maior.

A energia solar fotovoltaica se utiliza da energia solar para gerar energia elétrica utilizando os Painéis Fotovoltaicos (PVs). É através deste grupo que desenvolveremos o presente trabalho.

A principal razão de utilizar a energia fotovoltaica é a aplicação destas em locais distantes como e regiões do Norte e Nordeste do nosso país, bem como nos locais mais variados aonde a rede energética convencional não chegue, pois será possível atender equipamentos que necessitem da energia para seu funcionamento. Essa tecnologia poderia viabilizar a prática de bombeamento de água, a iluminação em geral, sistema de irrigação, de telecomunicação e cercas elétricas, por exemplo.

O economista Walter Bodra realizou pesquisas a respeito do uso de energia solar e calcula que a economia de luz pode chegar a 40% através do uso de tal tecnologia.

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. (BODRA, 2011, p. 1).

A utilização da energia fotovoltaica seria bastante útil ao nosso país em virtude dos elevados índices de raios solares durante praticamente todo o ano.

Embora outros países não possuam esta posição geográfica privilegiada que proporciona demasiadas radiações solares, estão investindo e utilizando este método de distribuição de geração advinda de painéis fotovoltaicos, como a Alemanha, por exemplo, conhecida como país do sol nascente.

A região brasileira que possui menores radiações, se comparada com a área com maior índice de radiação na Alemanha, possui 1,4 vezes mais radiação solar, demonstrando como o nosso país possui a capacidade solar para comportar o uso de tal tecnologia (SALAMONI; RUTHER, 2007).

A seguir, a Figura 3 demonstra os níveis de radiação solar no Brasil.



Figura 3 - Radiação diária – média anual típica

Fonte:www.cosol.com.br

Desde o ano de 2000, o governo alemão oferece subsídio para quem quiser instalar essas placas. Além de gerar sua própria energia, ainda pode comercializar com os vizinhos. Quem não quiser utilizar energia limpa paga uma sobretaxa. É daí que saem os subsídios fornecidos pelo governo e destinados aos adeptos dessa prática renovável.

Dessa forma, é que ocorre a diminuição no consumo de energia elétrica nos horários conhecidos como “horários de pico”, onde a utilização de energia elétrica é maior. Esse procedimento ocorre da seguinte forma: ao gerar excessivamente a quantidade de energia elétrica superior à usada pelo consumidor, esta energia em excesso vai para a rede elétrica e o usuário recebe da companhia esta energia que sobrou relativa ao gerado pelos PVs (MARTINS; RÜTHER; ABREU, atlas brasileiro energia solar 2009 apud ALVES, 2013, p. 17).

No Canadá, por exemplo, uma política de incentivo ao uso da geração de energia solar, vem sendo tomada, onde a concessionária *Ontario Power*

*Authority (OPA)* lançou um programa onde os pequenos empresários e agricultores poderiam instalar no telhado das residências microprojetos de geração de energia solar, de até 10 quilowatts, suprimindo o consumo interno, e quando ocorre a sobra, a mesma poderia voltar a rede de distribuição convencional e a concessionária pagaria um valor acima do normalmente cobrado por quilowatts. (ZONG, XIANGDONG, 2011).

No final de 2014, havia uma potência instalada de 180 gigawatts de geração de energia fotovoltaica, acima de 20% do ano de 2013. Países como a Alemanha, China, EUA, Japão e Itália constituem cerca de 70% da matriz energética mundial em geração fotovoltaica. Isto se dá por programas muito bem planejados de incentivo a esta geração, fato que vem crescendo no Brasil. Segundo MME (2014), dentro de cinco anos o Brasil poderá estar entre os 20 países com a maior geração de energia fotovoltaica do mundo.

A constante utilização de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos tende a aumentar, pois é um dos maiores campos de energia renovável a ser explorado. Em virtude disso, um crescente número de novos dispositivos e componentes para PV, em especial no que concerne a células e conversores de potência, estão sendo desenvolvidos neste mercado (ELTAWIL, MOHAMED A; ZHAO, ZHENGMING, 2010).

Espera-se que nos anos posteriores ocorra a redução nos custos de desenvolvimento de geradores fotovoltaicos, seja através de métodos realçando os cristalinos, estruturas e materiais que formam o PV ou através da realização de pesquisas para aprimorar a tecnologia relacionada a esse sistema.

De fato, a expectativa é que os nichos de mercado aumentem, especialmente para atender aquelas áreas de difícil acesso e com pouca energia elétrica. Porém, para isso, será necessária uma demanda de tempo considerável (PATTERSON, DEAN J, 2009).

O Ministério de Minas e Energia exerce as atividades de pesquisas e planejamento de programas de energia solar utilizando sistemas fotovoltaicos, com enfoque principal na geração de energia elétrica para áreas distantes e de difícil acesso, como em áreas rurais, por exemplo, onde há necessidade de energia elétrica para bombeamento de água, iluminação, sistemas de telecomunicação, escolas públicas, postos saúde entre outros (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).



Diante dessa explanação, verifica-se que existem muitos pontos positivos a serem obtidos através da utilização de geração de energia elétrica utilizando sistemas fotovoltaicos. Nosso país tem grande potencial para desenvolver o uso dessa tecnologia, mas ainda sofre com a escassez de investimentos para poder desenvolver produção e implantação desse sistema.

No mundo todo houve um crescimento significativo que dispõe do uso desse sistema elétrico, tendo em vista os incentivos dos governos e empresas públicas que contribuem para a adoção dessa tecnologia renovável.

No Brasil, será necessário uma conscientização e desenvolvimento de métodos de incentivo e até mesmo a necessidade de planejamento e alteração na matriz de energia elétrica, pois conseqüentemente o uso de energia aumentará principalmente nos centros urbanos brasileiros.

É nessa perspectiva que será explorado o presente trabalho, com enfoque na viabilidade da geração de energia elétrica através de projetos de implantação do sistema fotovoltaico destinados a aplicações remotas.

## **1.1 PROBLEMA.**

Como armazenar a energia vinda de um painel fotovoltaico em uma bateria através de um conversor CC-CC Cuk com uma malha de controle de tensão on-off com histerese, para que esta supra a demanda energética de áreas não atendidas pela rede de distribuição comercial?

## **1.2 OBJETIVOS.**

### **1.2.1 GERAL**

Este trabalho visa o estudo, projeto, simulação e implementação de um conversor de potência CC-CC Cuk para o processamento da energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos, junto com uma malha de controle de tensão on-off com histerese, e a diminuição das perdas no sistema em uma aplicação remota.

### 1.2.2. ESPECÍFICOS.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar os conceitos da geração de energia fotovoltaica.
- Estudar a topologia do conversor CC-CC Cuk.
- Estudar os conceitos e recomendações referentes a geração de energias renováveis.
- Estudar métodos de obtenção de um controle on-off.
- Selecionar e projetar a estrutura de potência do conversor CC-CC.
- Projetar a estrutura de um controle on-off.
- Realizar o equacionamento matemático do conversor CC-CC Cuk para obtenção de valores e parâmetros dos demais componentes nele presentes.
- Realizar o equacionamento da malha de controle de tensão on-off.
- Realizar as simulações computacionais do sistema completo.
- Realizar teste de cada componente individual em bancada.
- Realizar um teste prático com o sistema completo.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização de painéis fotovoltaicos para a geração de energia elétrica apresenta inúmeras vantagens, por ser considerada uma fonte renovável e inesgotável de energia. Usar a energia gerada a partir de painéis fotovoltaicos é uma alternativa que reduz os custos, e também evita o alto consumo de energia em determinados horários, contribuindo com a demanda energética e facilitando o uso em áreas remotas, como rurais, e locais de difícil acesso.

Outro ponto a ser levado em consideração é que a manutenção de um sistema de painéis fotovoltaicos é quase nula, sendo este um sistema de alta durabilidade.

A geração de energia renovável é um assunto muito discutido atualmente, tanto pelo seu benefício à sociedade quanto pela redução das tarifas.

Assim, este trabalho propõe o uso de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos para a aplicação em um sistema remoto, sendo este um tema de grandes pesquisas no Brasil, considerando sua imensidão e a

incapacidade do governo atender a demanda em locais mais retirados e de difícil acesso.

O Brasil é um país muito propenso ao uso de energias renováveis através de painéis fotovoltaicos devido o nível de radiação solar, que torna este assunto economicamente viável.

A aplicação da eletrônica de potência através da conversão e do tratamento cada vez mais eficiente pode contribuir de uma forma prática para o uso da energia solar, ajudando com relevância o meio social, político e ambiental.

## **2. METODOLOGIA.**

Este trabalho tem âmbito de pesquisa predominantemente quantitativa, sendo seu método de pesquisa exploratório. Assim é possível obter mais conhecimento do problema a ser pesquisado bem como proporcionar mais familiaridade e torna-lo mais explícito a construir hipóteses. A metodologia de desenvolvimento deste trabalho é dividida em seis etapas:

Etapa 1: Análise da literatura.

Etapa 2: Definição da topologia e forma de operação desejada.

Etapa 3: Equacionamento e definição dos valores de componentes.

Etapa 4: Simulações via *software*, e ajuste da topologia para atender o desejado.

Etapa 5: Montagem e simulação prática do sistema completo, considerando o cenário de uso.

Etapa 6: Análise dos resultados obtidos e conclusões.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1 GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

Quase todas as fontes de energias geradas são advindas diretas ou indiretamente da energia solar. Entre elas podemos citar a hidráulica, eólica, energia dos mares, entre outras.

A energia solar, compreendida entre os raios infravermelhos e raios ultravioletas, quando entra na atmosfera da terra pode ser captada e assim gerar energia elétrica. Estes raios são casualmente chamados de radiação solar, e a partir desta radiação que a energia é gerada.

Um material semicondutor que é usualmente utilizado é o silício, ao receber estímulos provocados por esta radiação, gera um fluxo de elétrons entre duas camadas semicondutoras, uma positiva e outra negativa. No uso de sistemas PV, quanto maior a geração de energia, consequência da maior radiação solar, haverá maior movimentação de elétrons no material e mais geração de corrente contínua.

Assim, podemos afirmar que o sistema se torna proporcional à radiação solar. Quanto mais radiação solar, mais geração de corrente contínua. O sistema PV gera energia até mesmo em dias nublados e de pouca luminosidade. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013).

O painel fotovoltaico usa a luz solar, absorvendo a energia dos fótons, de forma a convertê-la em energia elétrica, sendo este efeito nomeado fotovoltaico. Este uso é visto como uma geração limpa de energia sem impactos ao meio ambiente durante a sua operação, só produzindo uma quantidade mínima de poluentes na sua fabricação.

Entretanto, com métodos mais modernos já é possível a sua reciclagem, reduzindo ainda mais a agressão ao meio ambiente (ALVES, 2013). Segundo o ministério do meio ambiente (2013), há alguns impactos ambientais na fase de produção dos módulos fotovoltaicos, porém, sua vida útil que é de aproximadamente 30 anos e sua reciclagem, torna-o um bem durável.

Os efeitos relacionados à energia solar são os termoelétricos e os fotovoltaicos, de maneira que ambos aparecem em determinados tipos de materiais, quando estes são submetidos a alguma radiação solar. No efeito termoelétrico, a energia pode ser convertida de térmica para elétrica e de elétrica para térmica, no outro caso, uma diferença de potencial surge na junção semicondutora PN.

### 3.2 PAINEL FOTOVOLTAICO

O Painel fotovoltaico PV é uma peça chave para geração de energia solar, sendo ele responsável por toda a captação e geração de fluxo de corrente contínua.



Figura 4 – Representação do PV.

Fonte: Sunenergy (2016)

Seus principais componentes são as células fotovoltaicas de silício. Estas, com a incidência da luz solar, agitam os elétrons de polaridades opostas e geram o fluxo de corrente elétrica. Esta corrente elétrica vem na forma de corrente contínua (CC), e variando de tensões a partir de 12V a 68V e potências a partir de 40W.

Em processos onde a energia solar é usada para alimentar equipamentos de rede de distribuição convencional, é necessário todo um trabalho de conversão desta energia, passando pela adequação dos níveis de tensão e de inversão de frequência.

Após estes estágios, espera-se que haja perdas na conversão. Estas perdas têm valores bem significativos para o sistema, tornando o rendimento na conversão da energia solar um tema muito discutido em âmbito científico. Considerando apenas o efeito fotovoltaico, a tabela 1 mostra os respectivos rendimentos de placas fotovoltaicas com diferentes tipos de materiais semicondutores.

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos <sup>4</sup>	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (CuIn <sub>x</sub> Ga <sub>(1-x)</sub> Se <sub>2</sub> ) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4 ± 0,4

Figura 5 – Eficiência de painéis solares

Fonte: manual da engenharia para sistemas fotovoltaicos, (2014).

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados como sistemas isolados (*offgrid*) e os sistemas conectados à rede (*grid-tie*). Os sistemas isolados também muitas vezes chamados de sistemas autônomos são sistemas que não estão ligados à rede de distribuição de energia. São aplicados em lugares remotos, e de difícil acesso, ou onde o custo para que a rede de distribuição convencional chegue seja muito elevado.



Figura 6 – Esquema de um sistema não conectado à rede (*off-grid*)

Fonte: viridian, (2016).

Sistemas conectados à rede (*grid tie*) não necessitam de baterias para armazenamento da energia gerada. Conforme a geração excede a quantidade gasta pelo domicílio, o valor excedente é injetado na rede da concessionária.

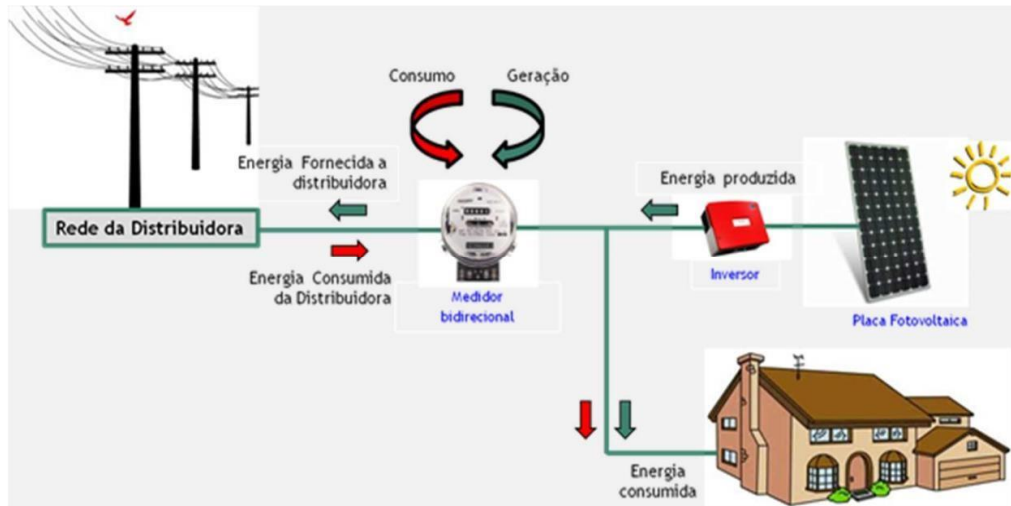


Figura 7 – Esquema de um sistema não conectado à rede (*grid tie*)

Fonte: viridian, (2016).

### 3.4 PARÂMETROS DO PAINEL FOTOVOLTAICO.

O funcionamento de um PV, painel fotovoltaico, pode ser baseado na operação de um circuito elétrico equivalente, representado na figura 8. O equacionamento resultante é apresentado na equação (1).

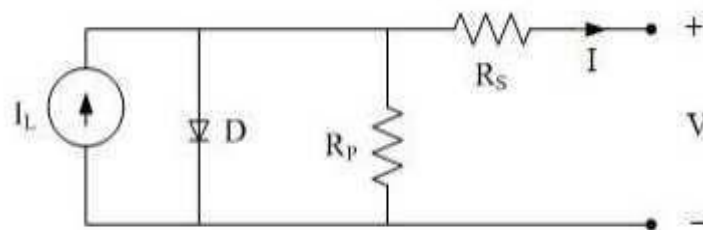


Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.

Fonte: manual da engenharia para sistemas fotovoltaicos. (2014).

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

Onde:

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

$I_{PH}$  – Foto corrente;

$I_R$  – 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;

$\eta$  - 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 da célula, e dependem também do grau de incidência solar.

Conforme a figura 9, podemos notar a característica da curva de tensão e corrente do PV, esta adquirida através da equação (1). A curva depende de  $R_S$  e  $R_P$ , temperatura e incidência solar. Pode-se observar na figura 9 um valor máximo de corrente e tensão ( $I$  e  $V$ ).

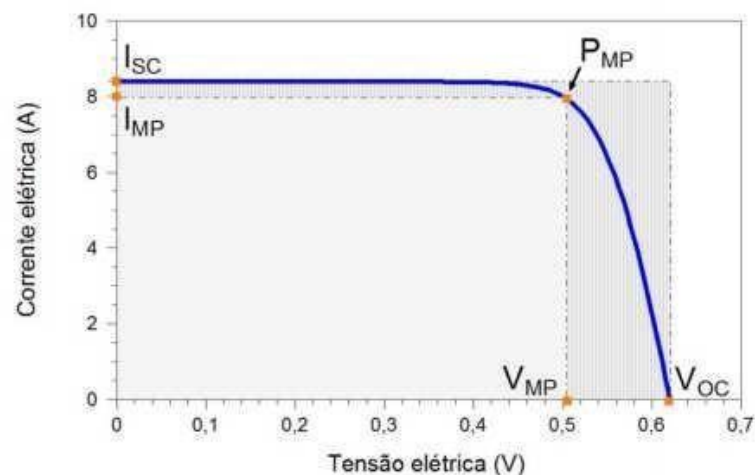


Figura 9 - curva corrente/tensão para uma célula solar fotovoltaica.

Fonte: manual da engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014)

A máxima potência de saída do painel é extraída do ponto  $P_{MP}$ , conhecido como MPP (*maximum power point*), sendo este dependente dos parâmetros estabelecidos do PV.



Existem vários métodos conhecidos de MPPT, técnica que rastreia o MPP, encontrados na literatura (BRITO, 2013). Neste trabalho, será empregada a técnica chamada  $D$  constante. O método de razão cíclica constante ou  $D$  constante consiste em estabelecer uma relação constante do ganho entre a tensão de saída da placa e a tensão de bateria, para diferentes condições de operação.

### 3.5 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM).

A modulação por largura de pulso, também conhecida como PWM, do inglês *pulse width modulation*, é uma modulação que mantém a amplitude dos pulsos constantes e altera sua largura.

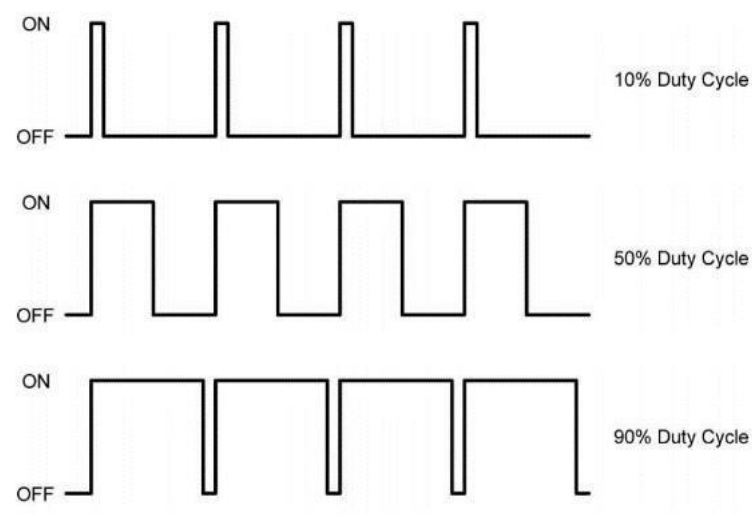


Figura 10 - Amostra pulsos PWM

Fonte: Mecaweb, (2014).

Esta modulação é obtida através de geradores de pulsos PWM, podendo ser eles circuitos integrados CIs ou também micro controladores. Nesta modulação, é possível definir o valor da largura dos pulsos conforme a necessidade do sistema.

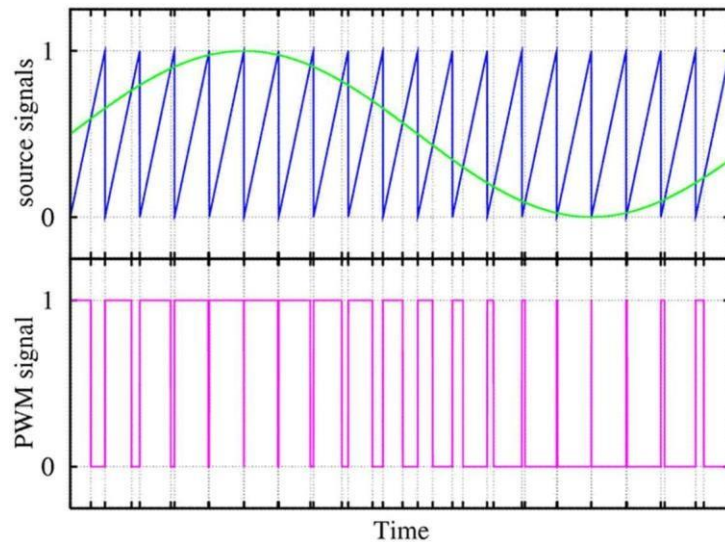


Figura 11 – Representação da modulação PWM.

Fonte: Clube do hardware 2016.

Desta forma, um uso bem comum da modulação PWM é no acionamento de transistores em circuitos de conversão de energia, que usualmente estão muito presentes nos sistemas de geração de energia solar.

### 3.6 BATERIAS E CARREGADORES.

Em sistemas autônomos (*off-grid*) de geração de energia solar, nem sempre o consumo elétrico é proporcional a demanda de radiação no momento. Assim, a presença de uma bateria é necessária para proporcionar o fornecimento constante de energia para o sistema e evitar o desperdício quando o consumo é baixo, possibilitando o armazenamento para um consumo posterior, nos momentos em que houver pouca radiação, ou à noite.

As baterias eletroquímicas são baterias responsáveis pelo armazenamento de energia elétrica através de processos químicos. Esta é a tecnologia mais antiga, e ainda hoje usada. Basicamente, baterias são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica como forma de corrente contínua (SOUZA, 2015).

Existem muitos tipos de baterias elétricas, sendo as mais comuns de níquel, cádmio e de chumbo ácido. As baterias de níquel são as mais caras, porém mais duráveis. Para algumas aplicações como sistemas remotos, onde

existe dificuldade para manutenção, este se torna vantajoso a longo prazo, proporcionando mais durabilidade ao sistema. (VILLALVA, 2013).

As baterias de chumbo ácido são as mais comuns e mais utilizadas, podendo ser de ácido líquido ou em gel, seladas ou abertas. As baterias seladas não necessitam da adição de água, um exemplo bem comum destas baterias é seu uso em automóveis.

Em aplicações fotovoltaicas, não é recomendado o uso de baterias automotivas convencionais, tendo em vista que para aplicações fotovoltaicas são necessárias baterias que admitam uma descarga profunda, ao contrário de baterias automotivas que fornecem correntes elevadas em pequenos espaços de tempo. O tipo de bateria usada em aplicações fotovoltaicas é a bateria estacionária. (NEO SOLAR, 2015).

### 3.6.1 TENSÃO DE FLUTUAÇÃO.

A tensão de flutuação é o nível de tensão que um sistema pode fornecer a uma carga, mantendo-a com uma tensão estável. Em média, uma bateria estacionária fornece 2V/el (volts por elemento). Como é comum possuir 6 elementos, sua tensão nominal de saída se torna 12V, igual as baterias automotivas.

Submetendo a bateria a uma tensão superior aos 12V, há então duas fontes de corrente contínua em paralelo e toda a corrente fornecida a bateria virá da fonte que detiver o maior potencial. Portanto, tensão de flutuação é a tensão na qual a bateria não fornece nenhuma corrente para a carga.

Por estar em paralelo com uma fonte de tensão mais elevada, ela mantém-se carregada e pronta para quando houver uma interrupção do fornecimento de energia para a carga, ou quando a fonte de maior potencial se tornar a bateria, ela começa a fornecer a energia para a carga.

A maior parte das baterias seladas tem uma tensão de flutuação de 2,23 V/el a 25°C, mas de forma mais genérica a tensão de flutuação deve ser mantida a 2,2 V/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).

Para obtermos a capacidade de utilização de uma bateria, devemos multiplicar a corrente de descarga pelo tempo de autonomia, e então obteremos a capacidade de armazenamento em ampere-hora (Ah). Como as baterias não são lineares, se a submetermos a uma corrente de descarga maior, o resultado será uma autonomia menor. Por exemplo, se designarmos uma bateria de 150 Ah, a um padrão de descarga de 20 horas, esta fornecerá 3,5 A no período. Este é um bom método para designarmos a capacidade de utilização de uma bateria nos diferentes modelos existentes.

### 3.6.2 CARREGADORES.

Carregadores são aparelhos de carga cíclica capazes de carregar totalmente uma bateria para que esta forneça energia a um sistema. A tensão normalmente utilizada em carregadores é de 14,8V, acima da tensão nominal de uma bateria de 12V. Isto se dá pela necessidade de uma diferença de potencial entre ambas. Por este motivo, ao efetuar o carregamento de uma bateria, não deve ela estar conectada a nenhuma outra carga a não ser ao carregador.

A tensão de operação de um carregador de flutuação é menor, por volta de 13,8V. Isso ocorre porque ele alimenta tanto a bateria como outras cargas ao mesmo tempo, então sua tensão é um pouco menor para que não cause danos aos sistemas acoplados a ele.

Ao utilizar uma bateria de chumbo ácido, o range de tensões suportadas é de 10,5V a 14,8V. Caso os valores das tensões nos polos de entrada da bateria atinja valores superiores ou inferiores ao suportado, a vida útil da bateria decresce muito. Uma bateria suporta poucos ciclos de descarga profunda (abaixo dos 10,5V), tornando-se assim sulfatada, ou seja, indica carga completa, porém perde sua capacidade de utilização. (HAYAMA, 2015).

### 3.7 COMPARADOR COM HISTERESE.

Os comparadores são utilizados para comparar valores de sinais analógicos de entrada com valores de sinais de referência, tendo em sua saída valores digitais. Comparadores são construídos para ter sua saída com valores digitais, então não operam com compensação de frequência, nem tem boas características de *offset drift* e ruído, o que o torna muito diferente de um amplificador.

A diferença entre um comparador com um amplificador se dá pela sua saída. A entrada tem aspectos bem parecidos, porém, o comparador tem uma saída em coletor aberto, que o diferencia do amplificador.

Como a saída do comparador é em coletor aberto, permite-se que seja calculado um resistor de *pull-up*, de acordo com as características do sistema (corrente, tensão, velocidade).

Dentre as várias aplicações possíveis com comparadores, está o comparador com histerese, ou "*schmitt-trigger*". Uma tensão de referência é aplicada em uma entrada do comparador e o mesmo satura ou bloqueia sua saída conforme o valor da outra entrada. Assim, o ciclo de histerese funciona dentre dois valores predeterminados, como *ranges* do sistema, conforme figura 12.

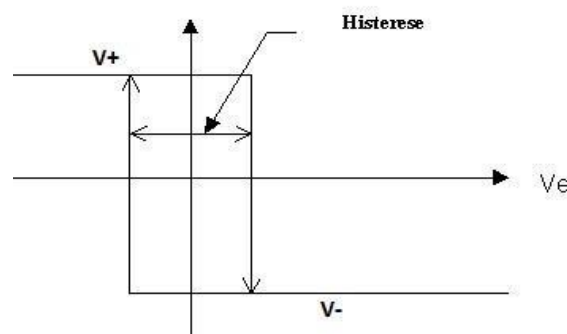


Figura 12 - Princípio de funcionamento do comparador com histerese.

Fonte: Autoria própria.

O comparador com histerese funciona com dois valores de referência usados no projeto do mesmo e que definem o ciclo de histerese. Os limites inferior e superior da histerese são obtidos pela realimentação positiva do

comparador. Esses limites podem ser usados para acionar ou desativar um sistema.

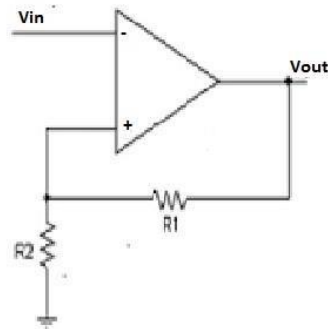


Figura 13 - . Representação de um comparador com histerese.  
Fonte: Autoria própria.

### 3.8 ESTÁGIOS DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS.

#### 3.8.1 ESTÁGIOS ELEVADORES.

Em aplicações fotovoltaicas, um PV normalmente fornece uma tensão de 12 a 68V. Este não é o valor comumente encontrado na rede de energia convencional de baixa tensão, que normalmente opera com 127 ou 220V. Assim, para que possa ser realizada a aplicação fotovoltaica, é necessário um estágio de elevação desta tensão.

Uma aplicação comum é associação de vários PVs em série ou paralelo, para que assim estes tenham uma potência e tensão satisfatórias para a aplicação convencional. Todos são ligados apenas em um conversor de potência. Este método é chamado *multi-strings* e pode ser observado na figura 14.

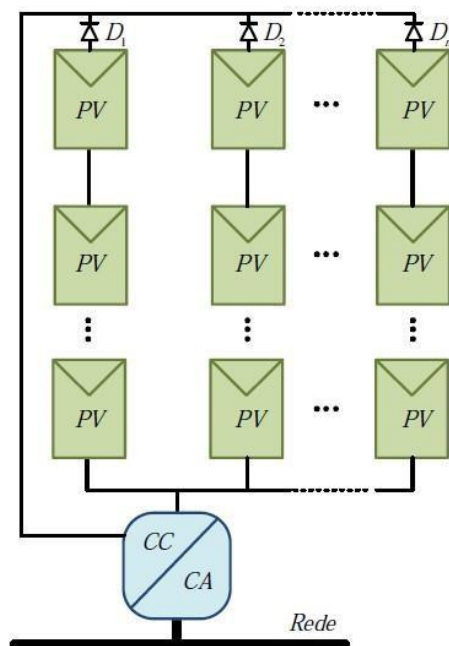


Figura 14-. Método de associação de vários PVs com apenas um conversor.

Fonte: Alves (2013).

Uma das características desta aplicação é a necessidade de utilização de diodos em seus ramos, para evitar o fluxo de potência entre os mesmos. Porém, estes diodos apresentam uma dissipação de energia que interfere no MPPT. Dado que a razão do MPPT é única para todos os painéis, e nem todos os PVs tem uma garantia que atinjam o MPPT juntos, assim gera-se um desperdício e uma ineficiência no sistema.

Devido a estas perdas nos diodos um novo método foi usado. Este trata de se usar a combinação em série, para formar um ramo, conforme figura 15. Assim, não é necessário o uso de diodos para evitar o fluxo de potência, diminuindo a dissipação.

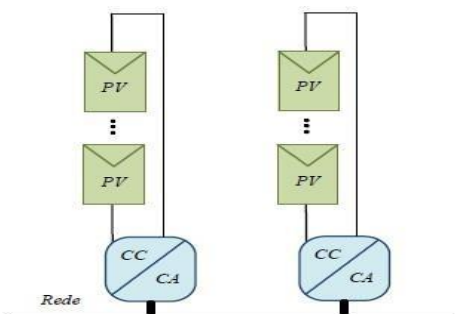


Figura 15 - Configuração em String para conversores solares.

Fonte: Alves (2013).

Tratando da aplicação do MPPT no método da figura 15 acima, opta-se por usar um menor número de PVs, para que esta trabalhe com bons resultados de rendimento. Usando aproximadamente 2 a 5 PVs as chances de atingir o MPPT aumentam. O sistema ainda continua trabalhando com bons números de potência entre 500W a 1000W.

Em alguns casos, quando os conversores usados não são galvanicamente isolados, a forma de se obter um ganho de tensão se dá por etapas elevadoras, lembrando que esta etapa apenas eleva o nível de tensão, e não converte a energia gerada no PV de CC para CA.

### **3.9 CONVERSORES.**

Nas aplicações da eletrônica de potência e aplicações fotovoltaicas é usual a utilização de conversores de potência. Estes são responsáveis pelo tratamento da energia a eles submetida, para fins determinados. Existe uma grande quantidade de topologias de conversores hoje, cada uma com uma finalidade e aplicação mais propícia, sendo as principais topologias as descritas a seguir.

#### **3.9.1 CONVERSOR CC-CC BOOST CLÁSSICO.**

O conversor CC-CC boost clássico é um dos conversores mais usados quando se quer tensões iguais ou acima das tensões de entrada. Por isso, esse conversor é denominado um conversor elevador. Sua topologia simples também o torna um conversor muito fácil de confeccionar, aumentando ainda mais a sua popularidade.

O conversor CC-CC boost é composto conforme figura 16 abaixo, este tipo de conversor tem uma tensão média de saída maior que a respectiva tensão de entrada, então o menor valor de tensão média na saída é igual ao da tensão de alimentação, sendo assim, torna-se obrigatório um indutor em série com a fonte para que esta trabalhe como uma fonte de corrente (BARBI,2000).



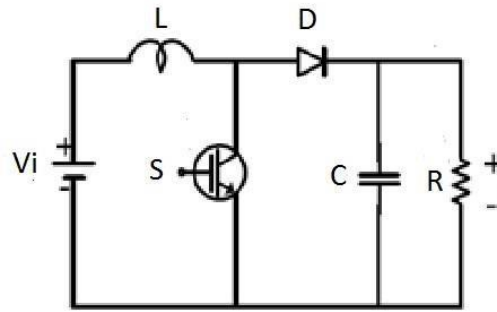


Figura 16 – Topologia do conversor CC-CC boost.

Fonte: Autoria própria.

O funcionamento da topologia do conversor boost deve ser analisado em duas etapas. Primeiramente, com o transistor S conduzindo, o diodo D entrará em bloqueio, pelo mesmo estar polarizado reversamente, impedindo a transferência de energia da fonte para a saída.

Quando o transistor S conduz, toda a tensão da fonte é aplicada no indutor L, fazendo a corrente de entrada aumentar, assim o indutor L acumula a energia, que é transferida para o capacitor C quando o transistor bloquear.

Um ponto a ser levado em consideração no projeto do conversor é que os componentes S e D devem aguentar uma tensão igual a tensão de saída. A equação abaixo refere-se ao ganho estático do conversor.

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2)$$

A variável  $V_o$  da equação equivale a tensão média de saída e  $V_{in}$  é a tensão média de entrada. O ganho é dado pela variável  $G$  e a razão cíclica pela variável  $D$ . Esta pode ser definida como a razão do tempo de condução do transistor e o período de comutação, conforme equação abaixo onde o tempo de condução equivale a variável  $T_{on}$  e o período de comutação a variável  $T$ , tendo como resultante a razão cíclica  $D$ .

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (3)$$

Todo o equacionamento que resultará nos valores dos componentes do conversor virá destas duas equações principais do conversor boost.

### 3.9.2 CONVERSOR BUCK.

Este conversor gera uma tensão média de saída abaixo do valor médio de tensão de entrada, sendo um conversor CC-CC denominado abaixador. Porém, a corrente média de saída é maior que a corrente média de entrada, tendo uma potência de entrada com valor próximo a de saída. O Buck é projetado para entregar uma tensão na carga que varia de zero volts, até o valor da tensão da fonte. (BARBI, 2000).

Considerando assim a razão cíclica  $D$  variando de 0 a 1, para 0 quando a chave está totalmente aberta, tem-se a tensão zero. Para  $D=1$ , tem-se uma tensão de saída igual à da fonte de alimentação. Assim, chamamos de ganho estático  $G$  a razão da tensão média de saída, e a tensão de entrada. As figuras 17 e 18 apresentam as etapas de operação do conversor Buck.

$$\frac{V_0}{E} = D \quad (4)$$

O funcionamento da topologia pode ser dividido em duas etapas. Primeiro o interruptor  $S$  (transistor) é fechado, assim a corrente de carga circula pela fonte  $E$ . Nesta etapa, há a transferência de energia para a carga. Com o interruptor  $S$  aberto, a corrente de carga circula pelo diodo, que tem como função atuar como diodo de roda livre (BARBI, 2000).

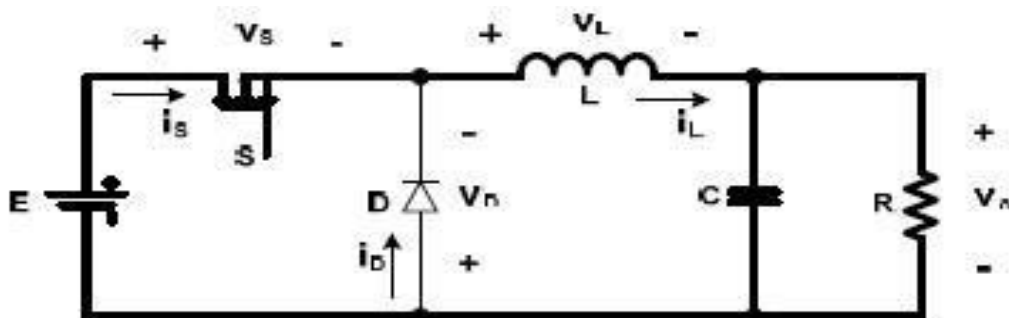


Figura 17 - Primeira etapa de funcionamento do Conversor *Buck*

Fonte: Font (2013)

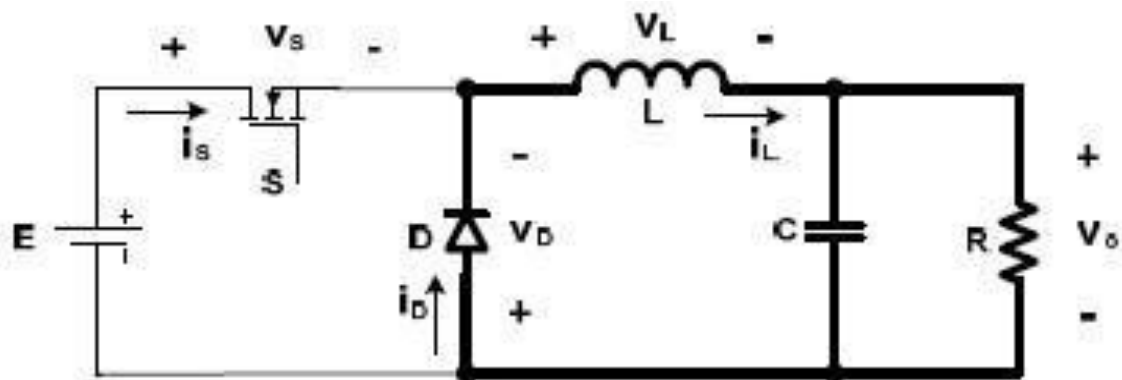


Figura 18 - Segunda etapa de funcionamento do Conversor *Buck*

Fonte: Font (2013)

### 3.9.3 CONVERSOR CUK.

O conversor Cuk é um conversor tipicamente empregado quando temos uma fonte de corrente contínua na entrada e uma carga na saída com as mesmas características, e queremos controlar o fluxo da entrada, sendo este um conversor de acumulação capacitiva.

Como este conversor tende a fazer a transferência da energia de entrada e saída com duas fontes contínuas, sua entrada assume uma característica de fonte de corrente, a qual transfere sua energia para o capacitor, e logo após o capacitor fornece a energia para a carga, também com característica de fonte de corrente. (BARBI,2000).

A topologia do conversor é bem simples, sendo ela composta por uma fonte  $V_i$ , dois indutores  $L_1$  e  $L_2$ , dois capacitores,  $C_1$  e  $C_2$ , um transistor  $S$ , um diodo  $D$  e uma carga representada pela letra  $R$ .

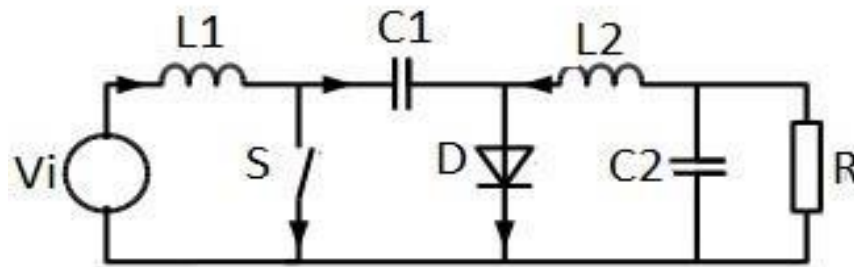


Figura 19- topologia conversor Cuk.

Fonte: Autoria própria.

Neste conversor, a transferência da energia entre as fontes de entrada e saída é feita por um capacitor, sendo o capacitor C1 da figura acima responsável pelas trocas de energia entre a entrada e saída do conversor. Nesta topologia, a tensão de saída tem a polaridade invertida em relação a tensão de entrada.

Este conversor pode operar em modo de condução contínua, onde a tensão do capacitor não se anula, e também em modo de condução descontínua, no qual se dá a descarga completa do capacitor. No modo contínuo a tensão de saída depende unicamente da razão cíclica, já no modo descontínuo depende da carga acoplada e da frequência de comutação. (SANTOS, 2015).

As figuras abaixo demonstram o modo de condução contínua do conversor Cuk.

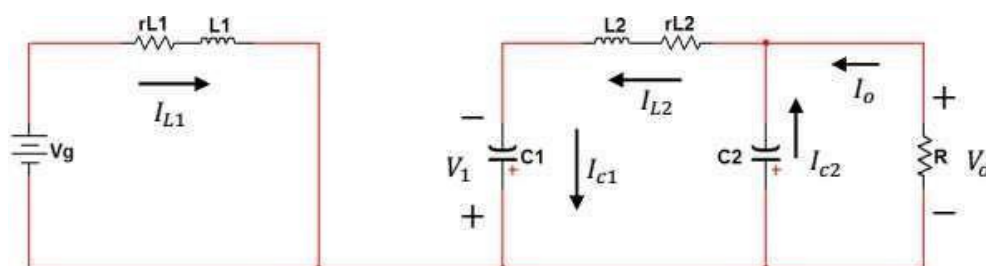


Figura 20 - Circuito Cuk com chave fechada

Fonte: Santos (2015)

Ao considerarmos a chave fechada da figura 20, a fonte  $V_g$  armazena energia na indutância  $L_1$ , enquanto ao mesmo instante o capacitor  $C_1$  transfere a energia para a indutância  $L_2$ , para esta alimentar a carga. O diodo  $D$  não

conduz nesta etapa, por estar polarizado reversamente pela energia advinda do capacitor C1. (SANTOS,2015).

Quando a chave é aberta, ocorre a polarização do diodo D e este começa a conduzir a corrente do indutor L1, carregando o capacitor C2.

Conseqüentemente, a carga também recebe esta energia. (SANTOS,2015).

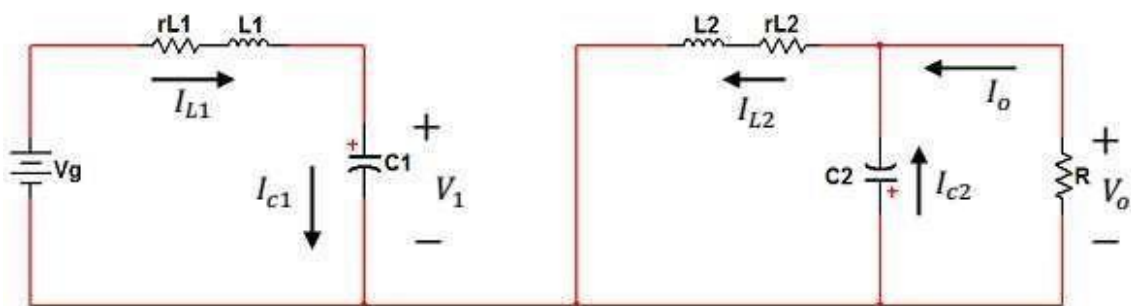


Figura 21 - Circuito Cuk com chave aberta  
Fonte: Santos (2015)

As vantagens do conversor Cuk se dão pelas reduzidas ondulações da corrente, tanto de entrada como de saída, podendo elas ser ainda mais reduzidas com a acoplagem dos indutores L1 e L2. (SANTOS,2015).

Os indutores também regulam a corrente da fonte e a corrente de saída, algo que não ocorre em outros conversores clássicos, o que reduz a necessidade de filtragem externa. (SIMAS, 2015).

A desvantagem é a utilização do capacitor para a transferência da energia, o que resulta em perdas proibitivas em potências elevadas. (SANTOS, 2015).

O Cuk com sua topologia se torna alto grampeado, característica que reduz os altos picos de tensão na comutação do transistor.

O Cuk é um conversor que combina características de um conversor abaixador e elevador, sendo possível chegarmos a tensões abaixo e acima dos valores da fonte, apenas variando a razão cíclica. (XIAO, 2011).

A figura 22 e a figura 23 abaixo demonstram o circuito do conversor Cuk com todos os seus parâmetros, utilizados para se obter o equacionamento matemático do conversor.

$$T = t_c + t_a = \frac{1}{f} \quad (5)$$

Onde:

$t_c$  = tempo em que o transistor S permanece conduzindo

$t_a$  = tempo em que o transistor S permanece aberta

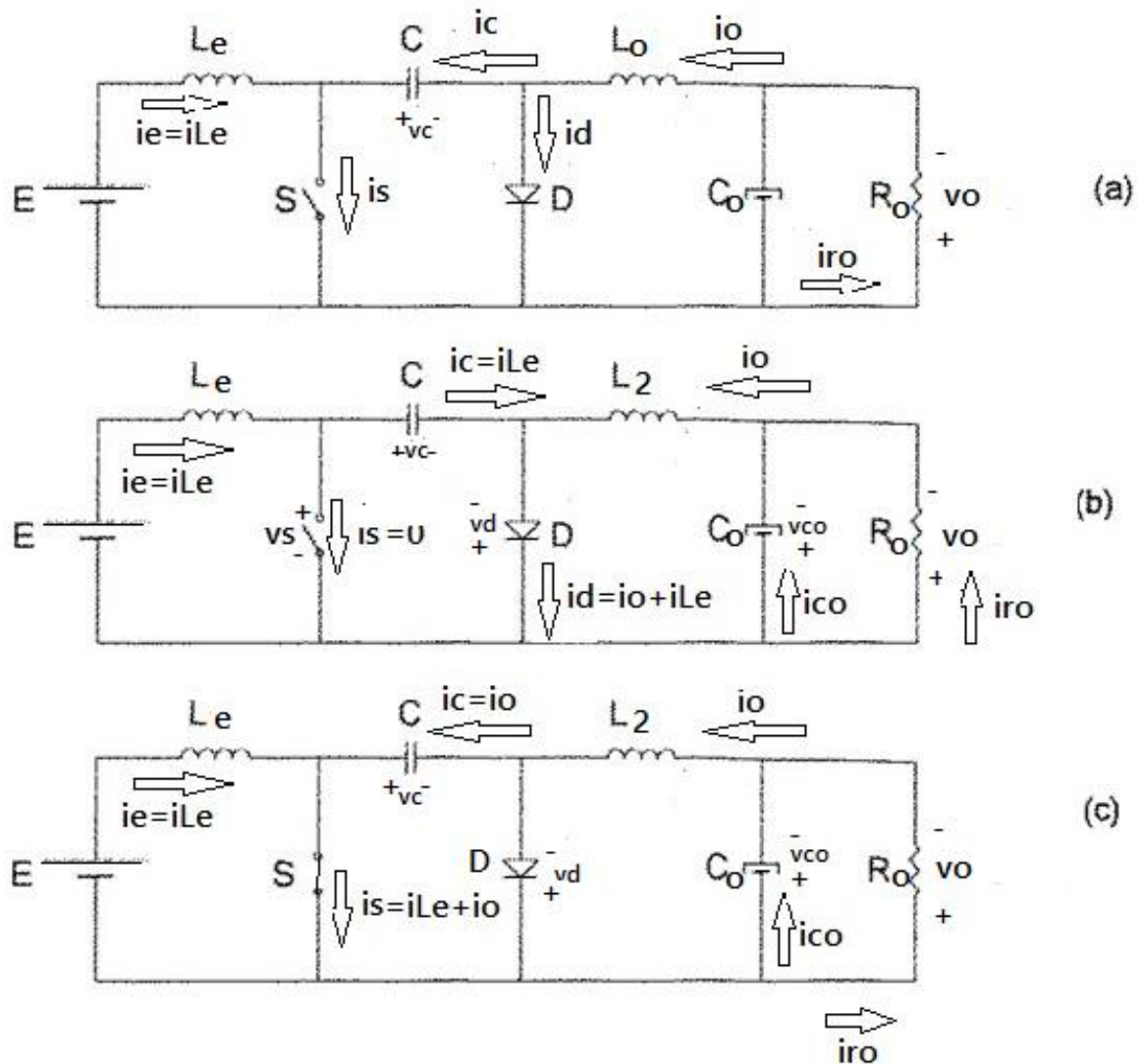


Figura 22 - Circuito de potência do conversor Cuk

Fonte: Adaptado de Barbi (2000).

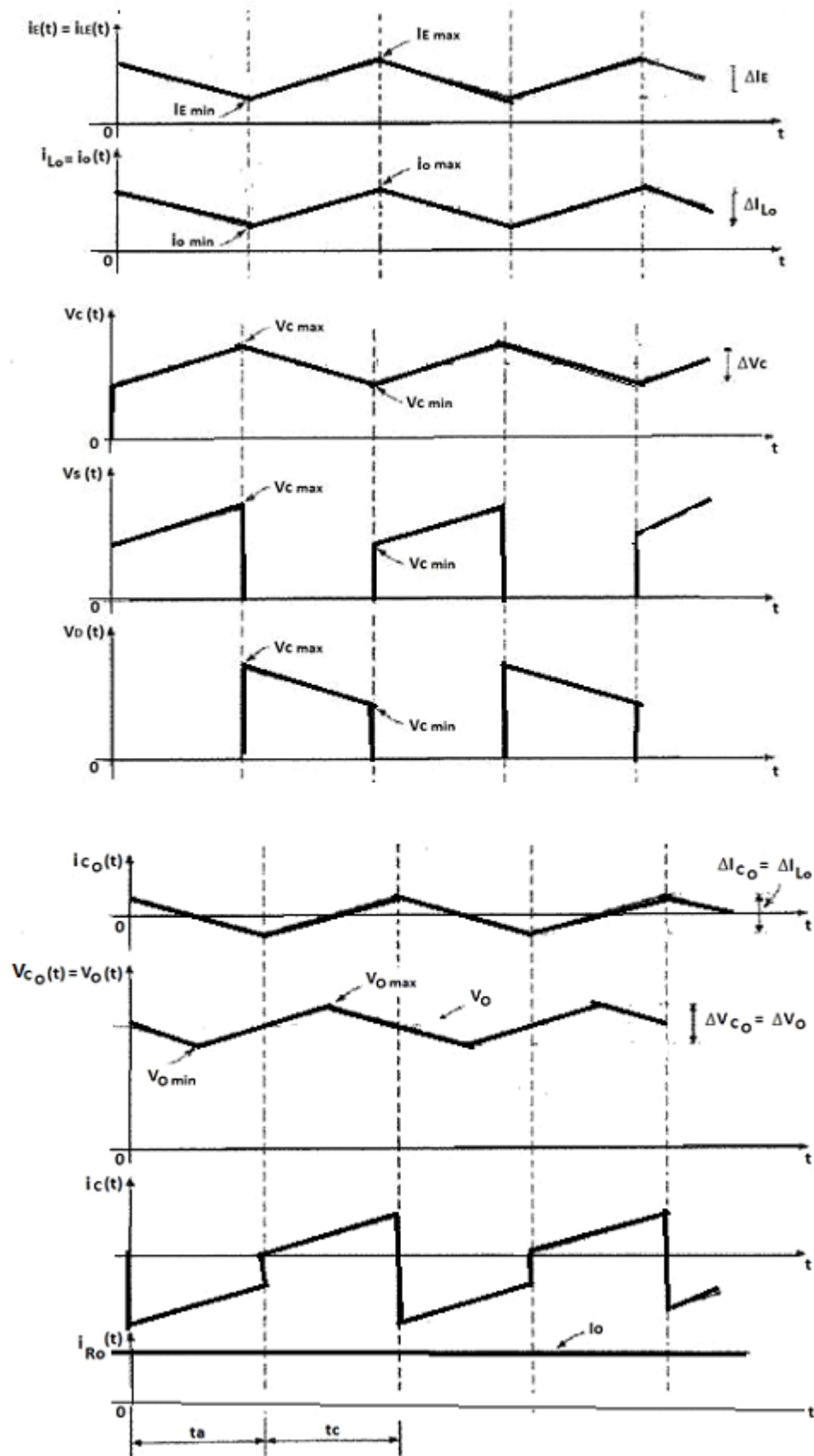


Figura 23 - Formas de onda para regime permanente (Cuk).  
 Fonte: Adaptado de Barbi (2000) .

#### 4. SISTEMA IMPLEMENTADO.

O sistema implementado neste trabalho foi projetado para fornecer energia elétrica a cargas remotas com uma alimentação de 12V.

Conforme as aplicações fotovoltaicas e a especificação do projeto, sendo ele de maior ou menor potência, este necessita possuir autonomia, dado que sua aplicação é remota. Olhando por este lado, temos alguns exemplos de aplicações, conforme (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 (boias, 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 e sinalizações para o setor de transportes, pois muitas destas originalmente demandam 12V para atenderem ao seu funcionamento.



Figura 24 - Estação meteorológica GRWS100 *Campbell Scientific*

Fonte: Campbell Scientific (2015) .



O sistema fará o uso de uma bateria de armazenando para depositar a energia gerada pelo PV. Isto torna possível a utilização do sistema quando há uma baixa incidência de luz solar, como por exemplo em períodos noturnos. Nestas ocasiões, não há geração suficiente de energia para a carga, sendo assim, a bateria assume o papel de fonte mantendo o sistema funcionando 24 horas.

Na etapa de conversão CC-CC, foi escolhido o conversor Cuk, devido a sua característica de controlar o fluxo de energia entre uma fonte de corrente contínua e uma carga com características de fonte CC. Assim, o conversor funciona como uma fonte CC injetando a energia gerada através do PV na bateria. Também pesa a reduzida ondulação de corrente de entrada e saída, podendo as mesmas ser mais reduzidas com o acoplamento dos indutores.

O sistema completo de conversão de energia é composto pelo PV seguido do conversor Cuk CC-CC alimentando uma bateria, tudo controlado por um comparador com histerese, que determinará, através da malha de tensão, os níveis máximo e mínimo de carga da bateria.

O painel fornecerá uma tensão aproximada de 16,6V e o conversor a abaixará para os níveis de operação da bateria.

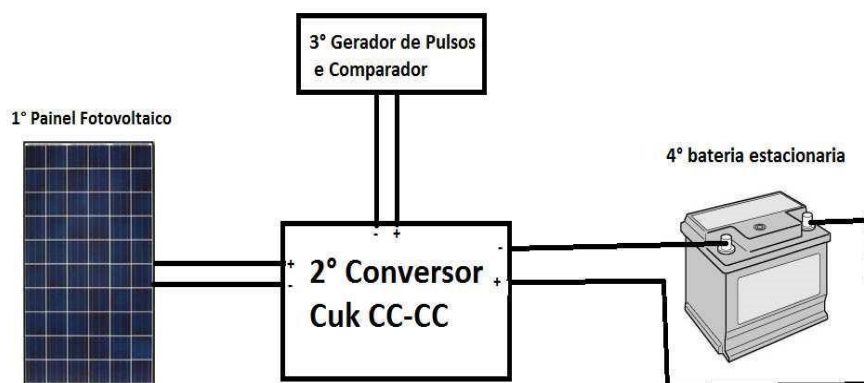


Figura 25- Estrutura do sistema

Fonte: Autoria própria.

Resumidamente, o sistema comporta-se da seguinte maneira:

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

O circuito comparador trabalhará junto com o gerador de pulsos PWM, CI SG3525 da *Texas Instruments*. A principal função do comparador será a de controlar os valores de tensão injetados na bateria, definindo um valor máximo e um valor mínimo, conforme figura 26 a seguir.

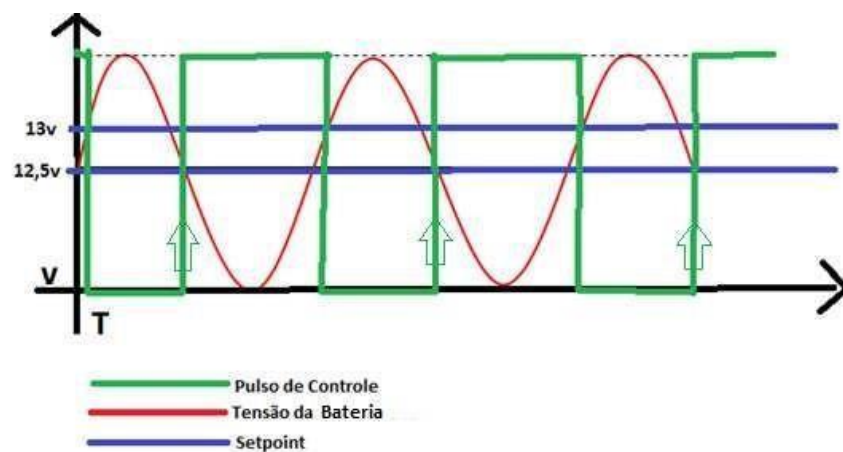


Figura 26- Funcionamento do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Assim, podemos dizer que o ciclo do sistema será o seguinte:

- Tensão da bateria abaixo ou igual a 12,5V, o gerador de pulso é acionado (baixo para alto).
- Tensão da bateria acima ou igual a 13V, o gerador de pulso é desligado (alto para baixo).

A técnica de MPPT utilizada neste trabalho foi *D* Constante, por ser um método de simples implementação. O método *D* constante mantém o PV operando em um valor de razão cíclica fixo, mesmo para diferentes condições de operação.

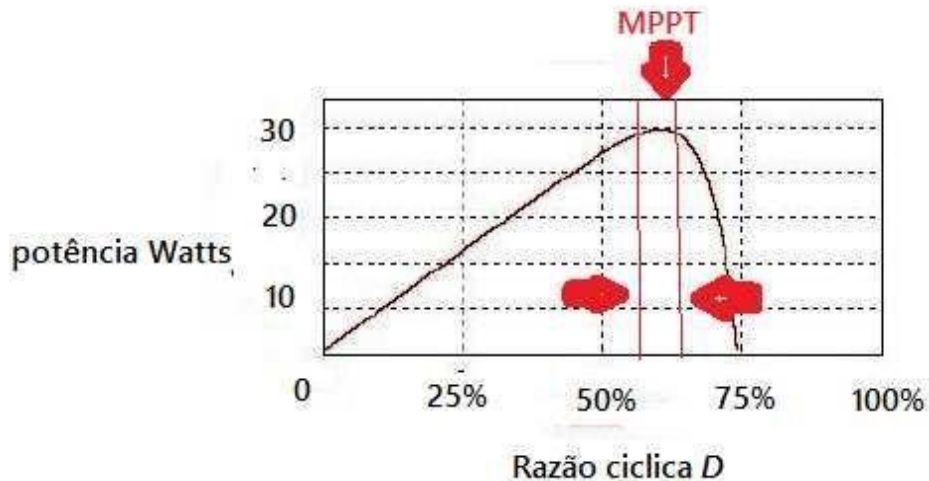


Figura 27- Exemplificação do  $D$  constante na técnica MPPT.

Fonte: Autoria própria.

## 5. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO CONVERSOR CUK.

A partir das formas de onda do conversor Cuk e seu princípio de funcionamento, podemos chegar as seguintes equações descritas abaixo, (estas que serão as utilizadas no projeto do conversor).

$$D = \frac{i_1}{i_1 + i_2} \quad (6)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \quad (7)$$

$$L_1 = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_{in}} \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_{out}} \quad (9)$$

$$C = \frac{D \times I_{out}}{f_s \times \Delta V_c} \quad (10)$$

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 L1) e corrente de saída (em L2)

$f_s$  = frequência de comutação (Hz)

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

$\Delta V_c$  = Variação de tensão no capacitor (V)

Utilizando os princípios de funcionamento do comparador com histerese, chegamos ao equacionamento do mesmo.

$$v_+ = \frac{15 \cdot (r_1 \cdot r_2 + r_2 \cdot r_3)}{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3} = 13v \quad (11)$$

$$v_- = \frac{15 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3} = 12,5v \quad (12)$$

$$\frac{(V_+)}{(V_-)} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 \cdot r_3} + 1 = \frac{13}{12,5} \quad (13)$$

Onde:

$V_+$  = equação da transição  $v_+$  do comparador.

$V_-$  = equação da transição  $v_-$  do comparador.

$R_1, R_2, R_3$  = valores de resistências.

## 6. 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:

- Utilizando (8) tem-se:

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

- Utilizando (9) tem-se:

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

- Razão cíclica:

Utilizando (7) tem-se:

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

- Ondulações:

$$\Delta I_{in} = \Delta I_{in} \times I_{in} = 0,05 \times 4,35 = 0,2175 \text{A} \quad (14)$$

$$\Delta I_{out} = \Delta I_{out} \times I_{out} = 0,05 \times 5,778 = 0,2889 \text{A} \quad (15)$$

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

- Corrente de saída:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{D}{1-D} \quad (17)$$

$$4,35 = \frac{0,4295 \times i_2}{1 - 0,4295} \quad \rightarrow \quad i_{2(out)} = 5,778^a$$

- Cálculo do capacitor:

Utilizando (10) tem-se:

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

## 6.1 PROJETO COMPARADOR COM HISTERESE.

- Cálculo da resistência do comparador com histerese.

- Utilizando (11) tem-se:

$$v_+ = \frac{15 \cdot (r_1 \cdot r_2 + r_2 \cdot r_3)}{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3} = 13v$$

- Utilizando (12) tem-se:

$$v_- = \frac{15 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3} = 12,5v$$

- Utilizando (13) tem-se:

$$\frac{(V_+)}{(V_-)} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 \cdot r_3} + 1 = \frac{13}{12,5}$$

R2=5,6k ohms.

R3=22,4k ohms.

R1=900 ohms.

## 7. SIMULAÇÃO ATRAVÉS DE SOFTWARE.

A figura 28 abaixo mostra a simulação do conversor Cuk no *software* PSIM®.

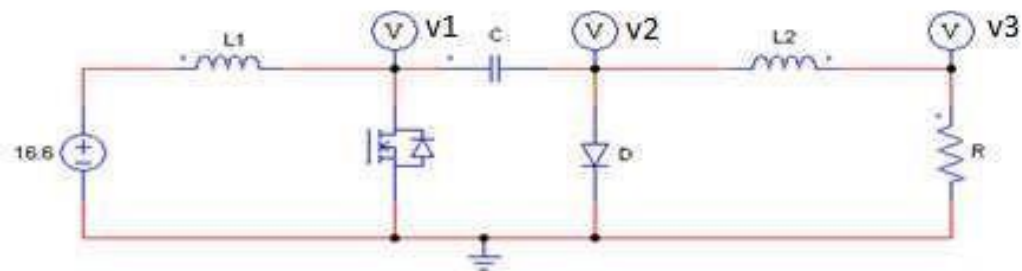


Figura 28 - Esquemático do conversor Cuk para simulações no PSIM®

Fonte: Autoria própria.

Como se trata de uma simulação, foi incluída uma resistência para simular a carga (bateria). O cálculo abaixo, mostra a resistência de carga que foi inserida no programa.

$$V_{out} = R \times I_{out} \quad (18)$$

$$12,5 = R \times 5,778 \quad R = 2,1633\Omega$$

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

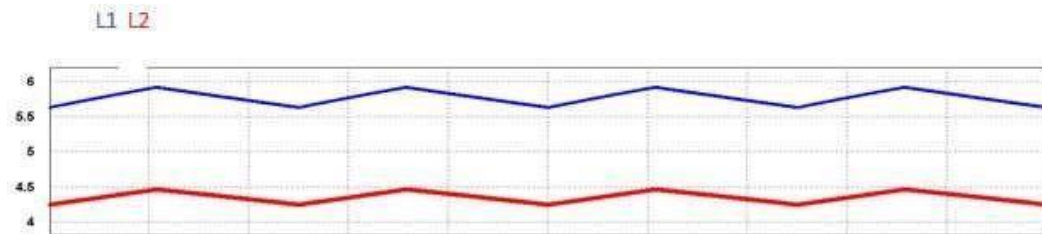


Figura 29 - Corrente de entrada (L1), corrente de saída (L2).

Fonte: Autoria própria.

A tabela 4 mostra os valores de correntes de entrada e saída extraídos da simulação, referentes aos valores médio e valores de medição respectivamente.

VALOR MÉDIO	VALOR DA MEDIÇÃO
L1 4,3500204e000	L1 4,4579840e000
L2 5,7768664e000	L2 5,9208653e000

Tabela 1 - Valores de correntes (simulação).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 mostra a tensão (VS-VD) sobre o capacitor.

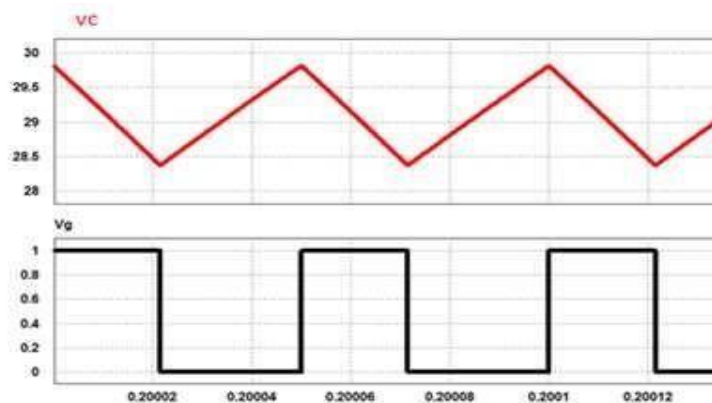


Figura 30 - Tensão sob o capacitor (VC) e pulso de controle (Vg)

Fonte: Autoria própria.

A tabela 5 mostra os valores da tensão média e valores de medição sob o capacitor.

VALOR MÉDIO	VALOR DA MEDIÇÃO
TEMPO 2,002000e001	TEMPO 2,002000e001
VS-VD 2,9097097e001	VS-VD 2,9816223e001

Tabela 2 - Valores de tensão (simulação).

Fonte: Autoria própria.

Os valores de corrente de entrada e saída do capacitor tiveram uma compatibilidade de 100% do calculado em relação ao simulado.

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

Simulação resultados:

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

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

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

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

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

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

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

Analisando assim os dados obtidos na simulação do conversor Cuk, podemos afirmar que os valores bateram com os simulados, e a variação de corrente de entrada e saída e a variação de tensão no capacitor do mesmo ficaram próximo a 5,0%, conforme requerido.



A figura 31 abaixo mostra o conversor Cuk com indutores acoplados, sendo esta a topologia implementada.

Com esta topologia podemos diminuir o volume de magnéticos, sem alterar a frequência de comutação, nem ter um aumento da perda da potência nos núcleos, dado que as formas de onda e o fluxo CA dos mesmos é praticamente idêntica.

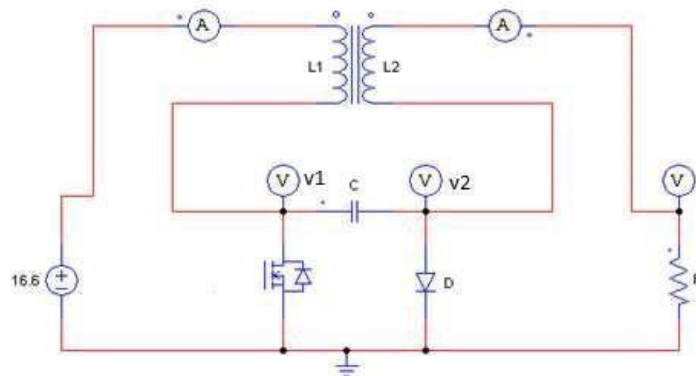


Figura 31 - Esquemático do conversor Cuk com indutores acoplados.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos com os indutores acoplados em relação às tensões e as correntes são os mesmos da simulação sem acoplá-los. Contudo, houve uma mudança significativa e esperada nas ondulações de entrada e saída do conversor, sendo que a ondulação de entrada diminuiu de 5% para 2,5% de ondulação e a de saída de 5% para 1,5%.

$$\begin{array}{llll}
 I_{in\ med}= 4,35A & I_{in\ max}= 4,39A & I_{in\ min}= 4,28A & \neq 0,11A \\
 I_{out\ med}= 5,77A & I_{out\ max}= 5,81A & I_{out\ min}= 5,72A & \neq 0,09\ A
 \end{array}$$

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

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

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

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

VALOR MÉDIO	VALOR DA MEDIÇÃO
TEMPO 2,002000e001	TEMPO 2,002000e001
I1 4,3458225e000	I1 4,392796e000
I2 5,7724895e000	I2 5,8152869e000
VG 4,300000e001	VG 4,300000e001

Tabela 3 - Valores de correntes com indutores acoplados (simulação).

Fonte: Autoria própria.

A figura 32 abaixo mostra a simulação do comparador com histerese no simulador ORCAD.

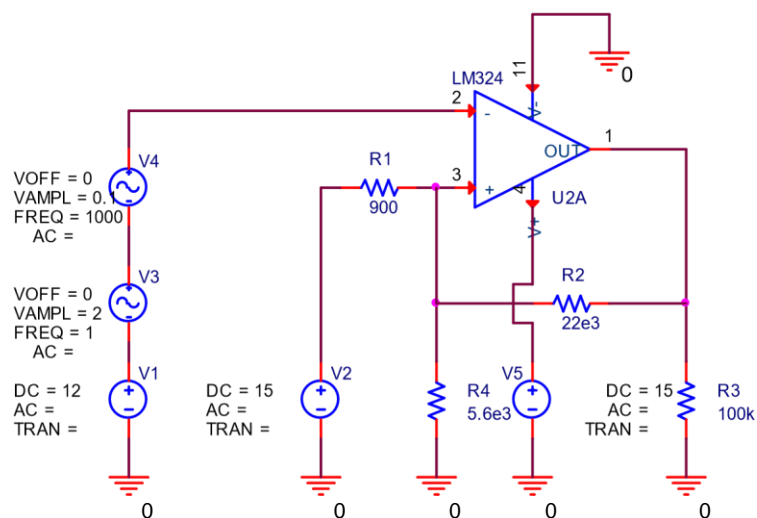


Figura 32- Simulação comparador com histerese.

Fonte: Autoria própria.

Como se trata de uma simulação, incluímos duas fontes V3 e V4 para simular um ruído, e uma carga R3 de 100k ohms simulando a carga.

Os resultados obtidos são demonstrados na figura 33, sendo que estes foram compatíveis aos calculados.

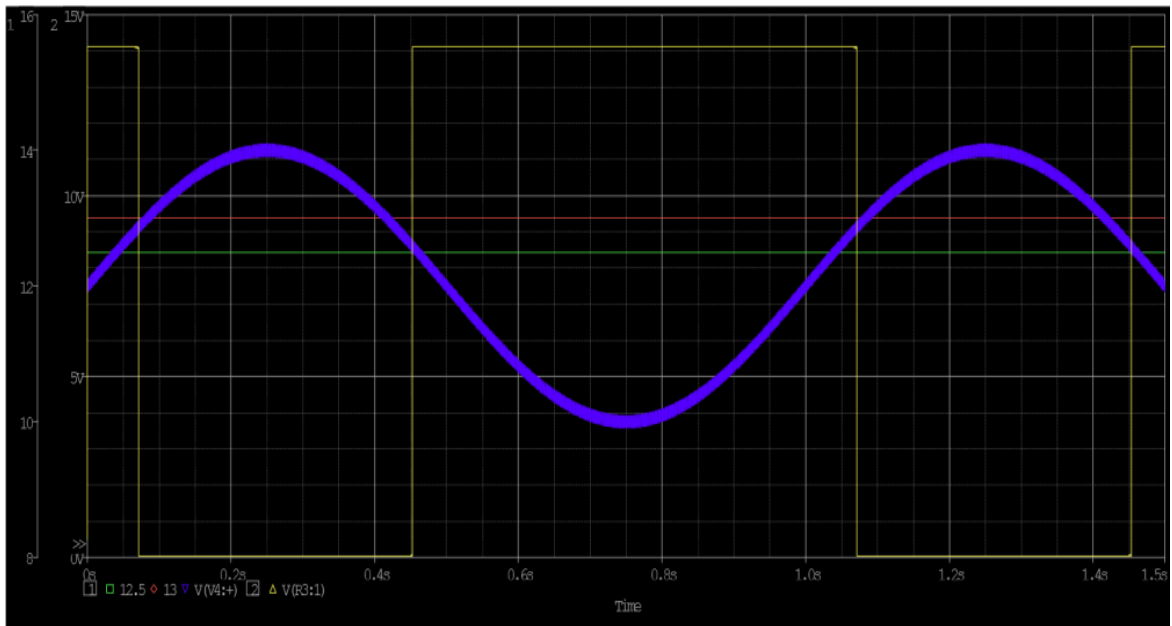


Figura 33 - Simulação comparador com histerese.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 34, podemos ver com o zoom, a transição de baixo para alto, e na figura 35 de alto para baixo.

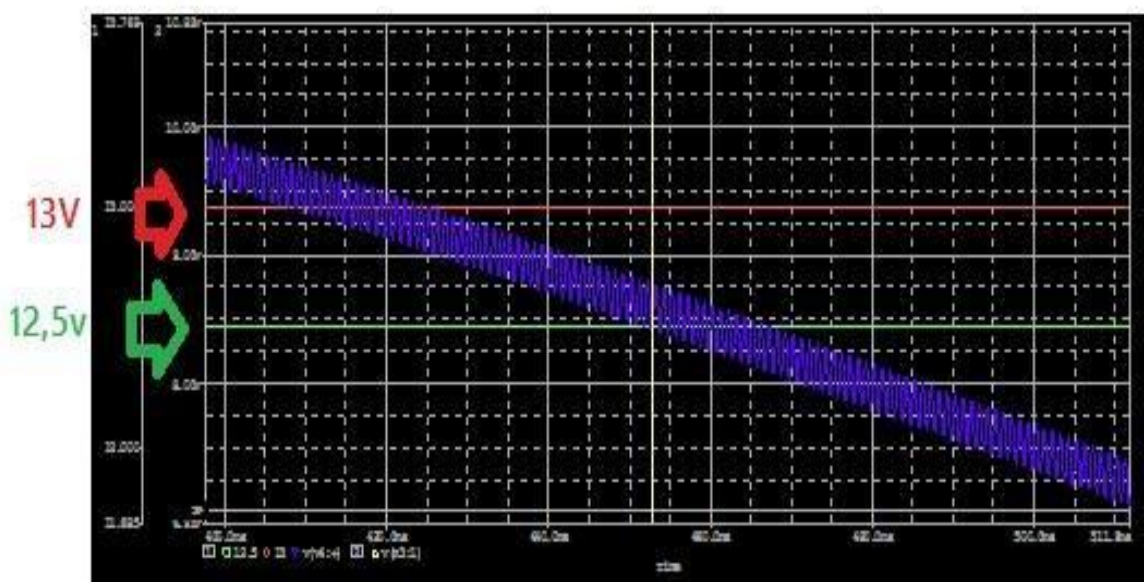


Figura 34- Simulação comparador com histerese transição de baixo para alto.

Fonte: Autoria própria.

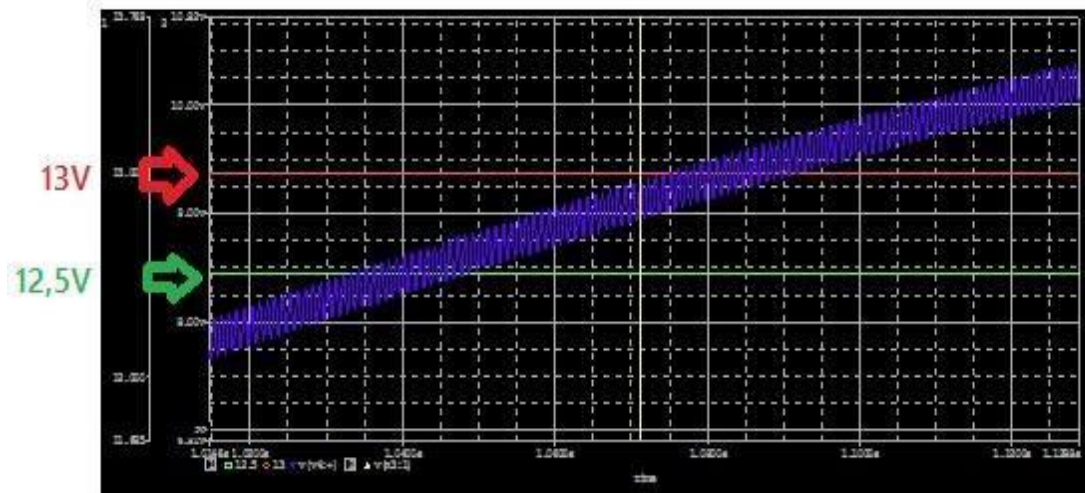


Figura 35- Simulação comprador com histerese transição de alto para baixo.

Fonte: Autoria própria.

Analisando assim as duas figuras podemos ver que houve uma diferença nos ranges ali marcados como linha vermelha igual a 13V e linha verde como 12,5V. Devemos estas diferenças ao erro do simulador e também aos valores de resistências que foram substituídos por valores comerciais.

## 8. PROJETO, TESTES E RESULTADOS PRÁTICOS.

### 8.1 PROJETO INDUTORES

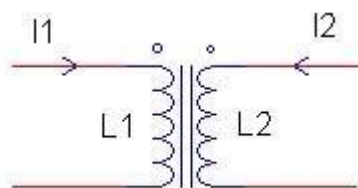


Figura 36 - Representação dos indutores acoplados magneticamente.

Fonte: Autoria própria.

As indutâncias acopladas calculadas ficaram com os seguintes parâmetros:

- 80,5 espiras (L1, L2).
- Fio 18 AWG (L1, L2).
- Área do entreferro=4,1mm
- Comprimento médio do enrolamento= 9,34m.

- Potência total dissipada 13,7W.
- Núcleo= 12 cm x 11,6cm

## 8.2 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.

Com o auxílio do *software designspark*, foi criado o esquemático do circuito impresso na placa de cobre. Analisando a figura 40 abaixo, nota-se o uso de borne de entrada. Estes são utilizados para facilitar a ligação de componentes à placa. A referência CONN refere-se a entrada do PV, para alimentar o sistema, bem como os pulsos de comando vindos do comparador com histerese. As referências CONN2 e CONN3 referem-se aos bornes dos indutores acoplados, L1 e L2 respectivamente. CONN4 é o borne de saída para carga, neste caso, a bateria.

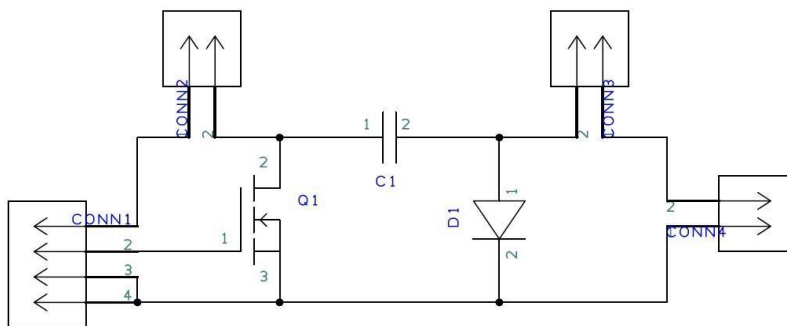


Figura 37 - Esquemático do circuito desenhado no software *DesignSpark*

Fonte: Arion,2016.

Dentre os componentes utilizados no circuito de conversão temos os seguintes listados abaixo:

- C1=Capacitor de polipropileno de partida de motor, 100  $\mu$ F/250VCA, 50/60Hz – Faston.
- Q1=Transistor MOSFET IRF630, 9A, 200V.
- D1=Diodo MUR1560.
- CONN1,2,3,4= bornes de plástico comuns.
- Placa de fenolite para soldagem dos mesmos.

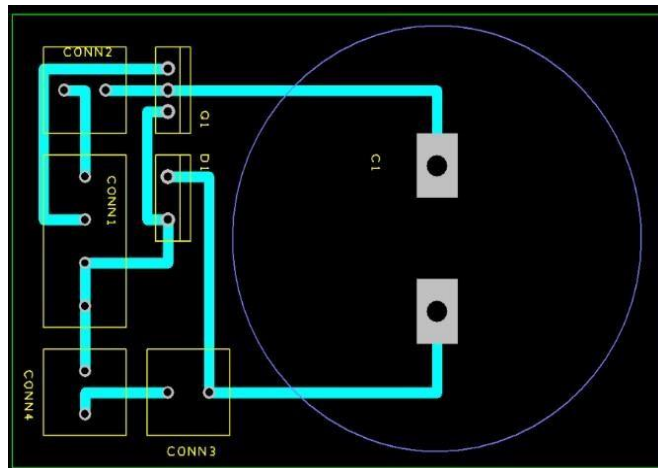


Figura 38 - Circuito impresso no software *DesignSpark*.

Fonte: Arion,2016.

Após o projeto do circuito impresso no *software*, o *layout* criado foi impresso em uma placa de fenolite, através de um processo térmico. Após o processo térmico e o desenho já transferido a placa de fenolite, esta foi banhada em uma solução de percloroeto de ferro e água, a qual em contato com o fenolite, o corroem, deixando apenas as partes onde a desenho foi transferido. Após a placa pronta, foram feitos os acabamentos com furador, lixa, alicates, até a soldagem dos componentes.

### 8.3. CIRCUITO DE COMANDO.

Para geração de sinal PWM (*pulse-width modulation*), foi utilizado como modulador de largura de pulso o CI SG3525 da *Texas Instruments*.

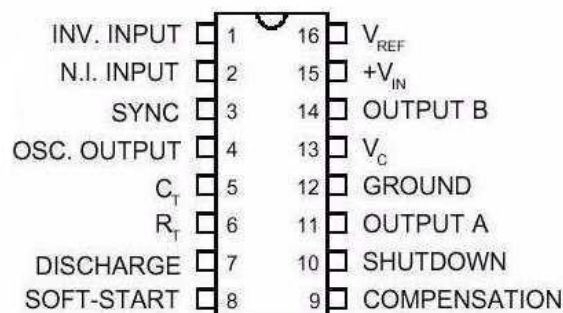


Figura 39 - Pinagem do CI SG3525

Fonte: Texas Instruments (2015).

A razão pela preferência do CI SG3525 foi pelo seu menor tempo de subida, comparado ao SG3524. Isto se comprovou em testes feitos em bancada. As figuras abaixo mostram o sinal de pulso dos dois CIs quando ligados a um capacitor de 3,3 nF.

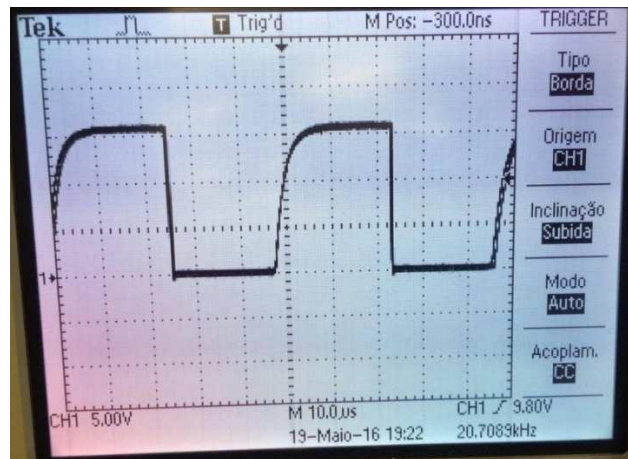


Figura 40 - Pulsos do CI SG3524.

Fonte: Autoria própria.

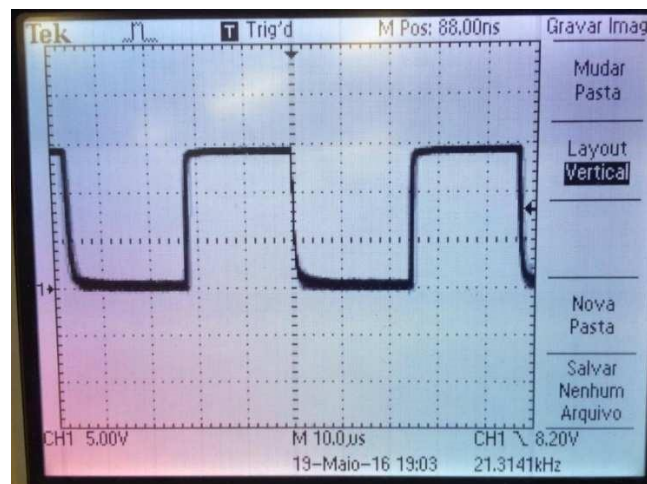


Figura 41 - Pulsos do CI SG3525.

Fonte: Autoria própria.

Como podemos analisar, o SG3525 se mostrou superior ao SG3524, justificando assim a nossa escolha para o circuito de controle.

A figura abaixo demonstra o esquemático final da malha de controle de tensão, que possui os seguintes componentes:

## SG3525

- Alimentação 15v.
- R1=390 ohms.
- R2=910 ohms.
- C1=220 nF.
- C2=10 nF.
- Potenciômetro=10k ohms.

## Comparador com histerese.

- Alimentação 15v terminal negativo.
- Alimentação bateria terminal positivo.
- R3=22k ohms.
- R4=5,6k ohms.
- R5=900 ohms.
- Amp-op= lm319.

## *Buffer*

- Alimentação de 15v.
- Transistor=2907.
- Diodo=1n4007
- R6=22k ohms.
- R7=1k ohms.

Como podemos analisar, a tensão da bateria chega até o comparador que satura a saída 9 do SG3525, se este estiver fora dos ranges predeterminados. Ao mesmo instante, o SG3525 satura os pulsos da saída 13, que está conectada ao *buffer*, interrompendo os pulsos no transistor do conversor Cuk.

Assim, esta é uma forma simples de resolver um problema bem comum no uso de circuitos de comando.



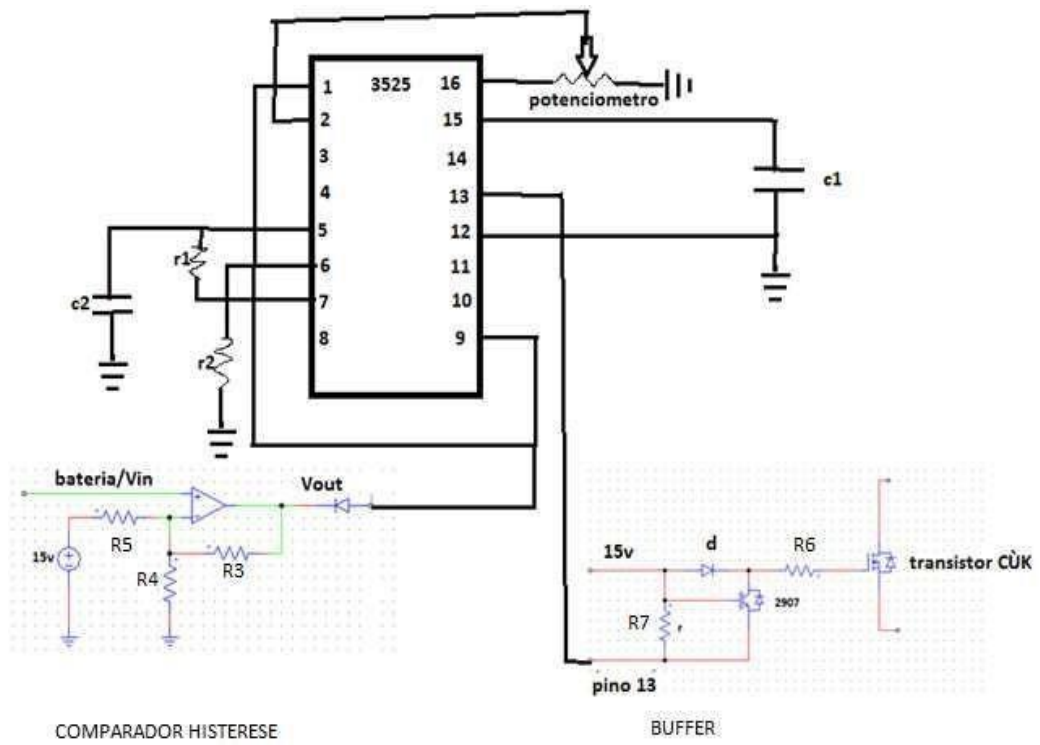


Figura 42 - Circuito de malha de tensão.

Fonte: Autoria própria.

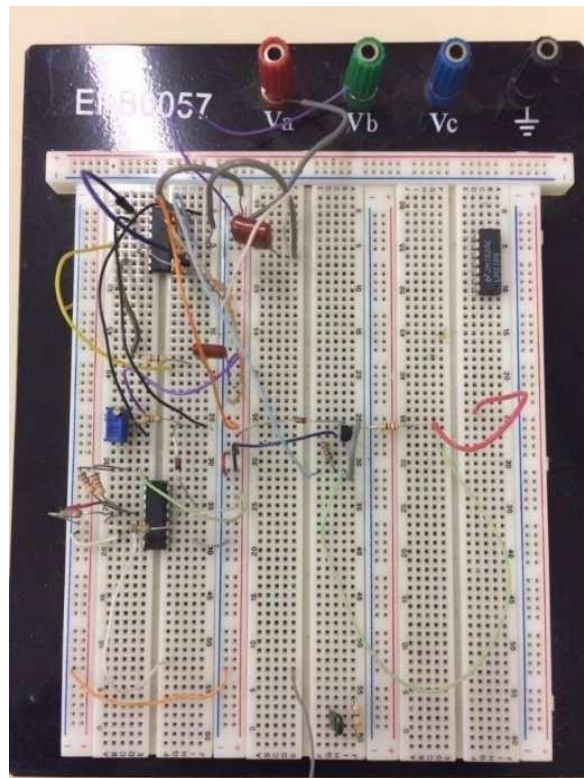


Figura 43 - Circuito de comando finalizado em *protoboard*.

Fonte: Autoria própria.

## 8.4 LISTA DE MATERIAIS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES.

- Bateria Estacionária *Freedom Heliar* DF2500,12V/165Ah, chumbo/selada.
- Fonte CC Regulável bancada (tensão / corrente)
- Fonte CC Regulável acima de 4,5A
- Multímetro Digital
- Osciloscópio Digital Tektronix DPO 3014.
- Osciloscópio agilent
- Ponteira de corrente
- Conversor *Cuk*

## 8.5 TESTES DO CONVERSOR E CIRCUITO DE COMANDO (BANCADA LABORATÓRIO)

Em laboratório foram realizados os testes do conversor do circuito de comando e do comparador com histerese para que os mesmos tenham seu funcionamento e desempenho averiguados conforme o que fora projetado.

Primeiramente, foi testado o conversor para assim vermos se o mesmo estava alto grampeado. Conforme a figura, podemos ver que o conversor *cuk* é alto grampeado impedindo altos picos de tensão, o que demonstra seu funcionamento correto.

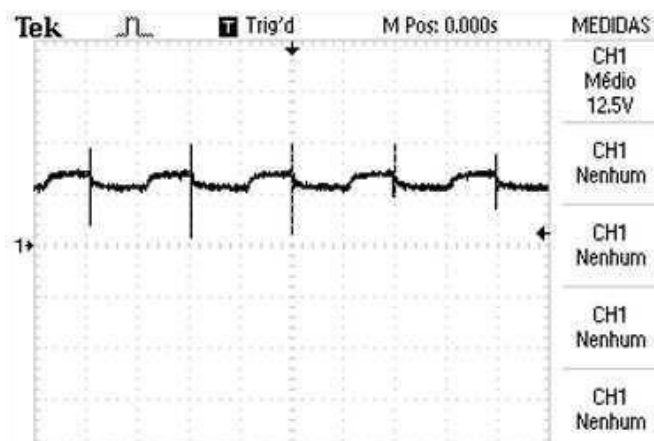


Figura 44 – Teste para comprovar o auto grampeamento do conversor cc-cc Cuk.  
Fonte: Autoria própria.

A ondulação também foi verificada e teve seu valor reduzido dado a acoplagem dos indutores, fato que dá veracidade ao estudo.

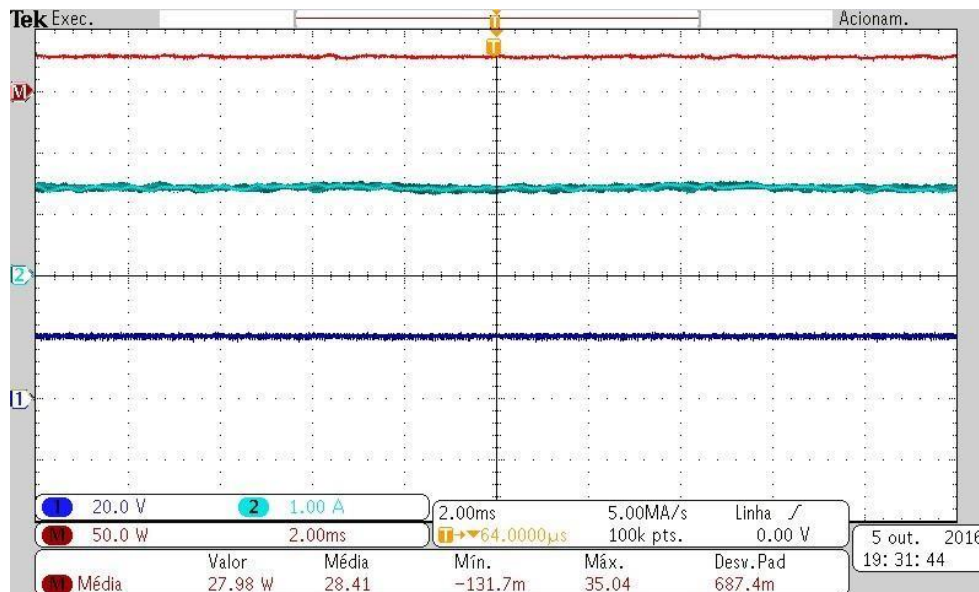


Figura 45 – teste para comprovar a funcionalidade do circuito e retirar resultados.

Fonte: Autoria própria.

Dada a veracidade das análises, a fonte de bancada foi regulada em 15V, esta que servirá para alimentar o SG3525 bem como o comparador com histerese. Um capacitor de 100uF foi colocado na saída do circuito para que o mesmo fosse testado independente do conversor.

O teste demonstrou um funcionamento excelente do comparador com histerese, operando nos ranges já definidos, juntamente com o SG3525, que quando atingia os valores de 13V saturava sua saída e quando diminuía e atingia os valores próximos a 12,5V retomava os pulsos de comando.

Após o teste, o circuito de comando foi conectado no pino Gate do transistor do conversor Cuk, ajustando a razão cíclica pelo potenciômetro até o valor já calculado de 0,42.

A segunda fonte foi conectada nas entradas do PV, esta que precisava ser maior, devido as correntes de entrada ultrapassarem os 4,5A, para assim simular uma condição fora de laboratório, onde no decorrer do teste a mesma foi elevada de 0 a 20V no decorrer do tempo.

Na saída do conversor foi conectada a bateria em série com um multímetro medindo a corrente advinda do conversor.

A figura 46 abaixo demonstra o sinal obtido na saída do circuito de comando, conectado ao Gate do transistor do conversor.

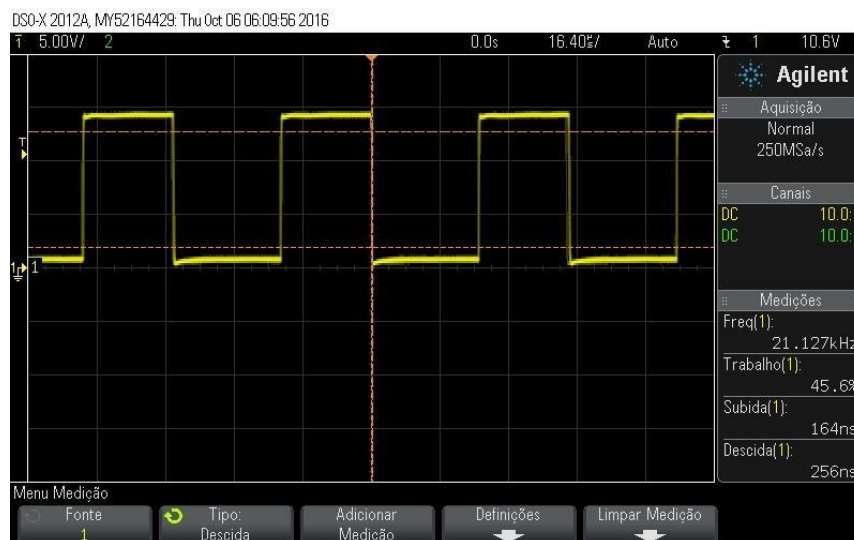


Figura 46- Sinal do circuito de comando.

Fonte: Autoria própria.

Podemos verificar na figura acima que não há ruídos no circuito, demonstrando assertividade na escolha do SG3525 para atuar como circuito de comando.

Assim, conforme a fonte que simulava o PV teve sua tensão elevada, o multímetro conectado a bateria elevou sua corrente, concomitantemente. Quando a tensão da fonte chegou ao valor nominal, a elevamos ainda mais para assim termos uma visão mais ampla do funcionamento do circuito.

<b>PV</b>	<b>PV</b>	<b>BATERIA</b>	<b>BATERIA</b>	<b>RENDIMENTO</b>
Vin	Pin	Vout	Iout	
15V	14W	12,7V	1A	0,907
16,7V	20,5W	12,7V	1,35A	0,83
17V	25,7W	12,7V	1,5A	0,74
20V	34W	12,7V	1,82A	0,68

21V	37,2W	12,7V	2A	0,68
-----	-------	-------	----	------

Tabela 4 – resultados teste pratico com  $D=0,42$ .

Analisando os primeiros resultados obtidos com uma razão cíclica de 0,42, aumentada posteriormente para 0,48 e 0,54, para assim obtermos mais resultados, conforme tabelas 5 e 6.

<b>PV</b>	<b>PV</b>	<b>BATERIA</b>	<b>BATERIA</b>	<b>RENDIMENTO</b>
Vin	Pin	Vout	Iout	
13V	18,4W	12,6V	1,4A	0,96
15V	30W	12,7V	1,7A	0,72
16,7V	35W	12,7V	1,8A	0,65
17V	37W	12,7V	1,85A	0,63
21V	42W	12,7V	2A	0,60

Tabela 5 – resultados teste pratico com  $D=0,48$ .

<b>PV</b>	<b>PV</b>	<b>BATERIA</b>	<b>BATERIA</b>	<b>RENDIMENTO</b>
Vin	Pin	Vout	Iout	
13V	35W	12,7V	1,65A	0,59
15V	41,2W	12,7V	1,72A	0,53
16,7V	43W	12,7V	1,65A	0,48
17V	45W	12,7V	1,82A	0,51
21V	49W	12,7V	1,9A	0,49

Tabela 6 – resultados teste pratico com  $D=0,54$ .

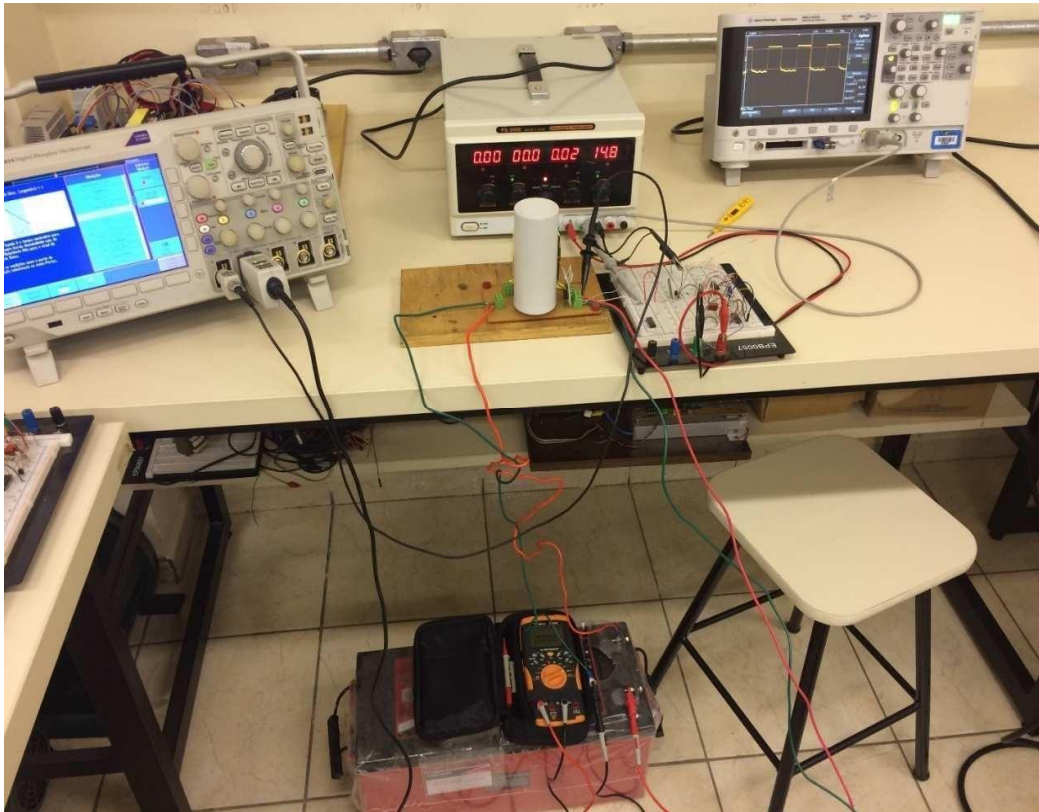


Figura 47- Teste do circuito de comando e do conversor conectado à uma carga.

Fonte: Autoria própria.

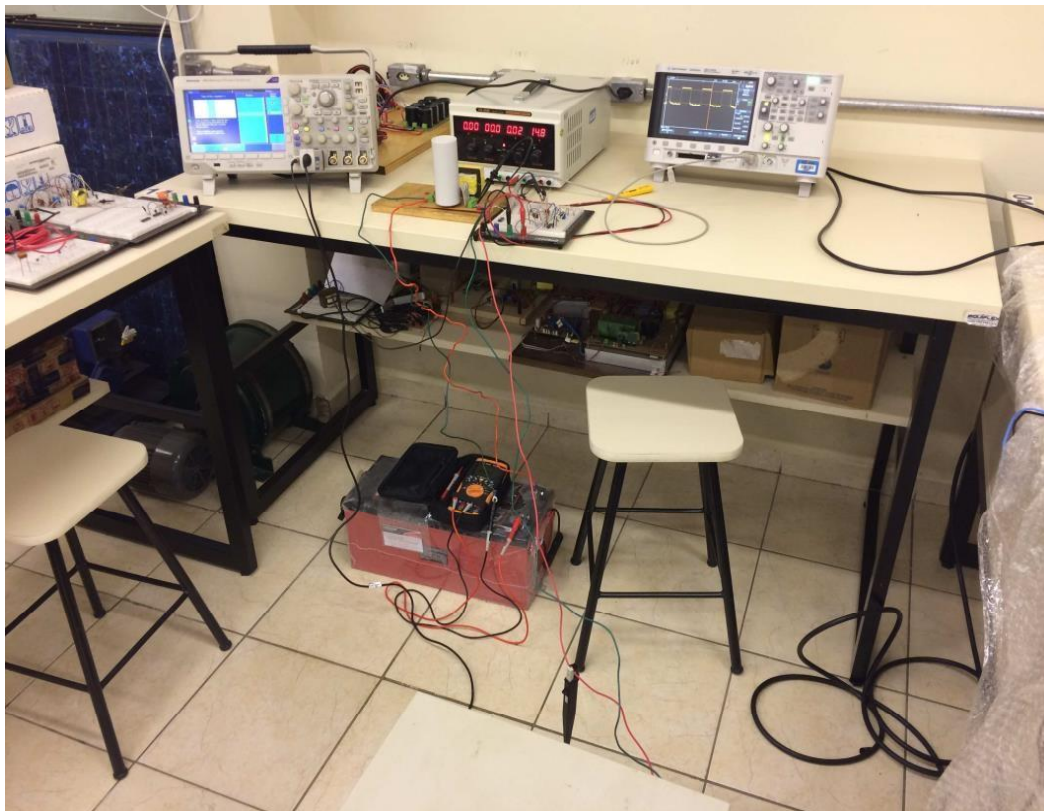


Figura 48- Teste do circuito de comando e do conversor conectado a uma carga.

Fonte: Autoria própria.

Após alguns resultados obtidos, resolvemos testar a resistência série equivalente do capacitor do conversor Cuk, sendo que se tivessem um valor muito elevado, o mesmo poderia alterar com significância o rendimento do conversor.

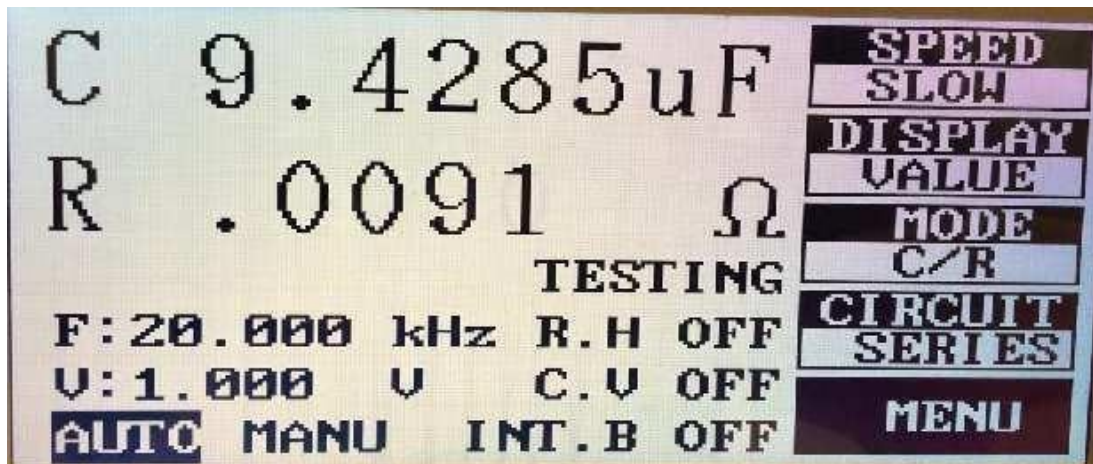


Figura -49: teste resistência capacitor do conversor cuk.

Fonte: Aatoria própria.

Após o teste podemos observar que a resistência equivalente do capacitor não tem um valor significativo, não sendo ela a responsável pela perda de rendimento do conversor, sendo dispensada esta hipótese.

## 8.6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Após todas as partes do circuito serem testadas, podemos chegar a algumas conclusões. Primeiramente a escolha do circuito de comando através dos testes entre dois modelos revelou qual teria mais capacidade de atender os objetivos do trabalho, tal que o modelo SG3525 foi o escolhido, demonstrando no teste final a assertividade, dado que operou sem muitos ruídos e acima de razões cíclicas de 0,5, devido a utilização do *buffer* que este trabalho propôs.

O comparador com histerese teve um funcionamento excelente, atingindo os ranges já calculados e trabalhando em conjunto com o circuito de comando que saturava e bloqueava os pulsos no Gate do conversor Cuk, demonstrando a viabilidade do mesmo neste tipo de aplicação. Também o uso do *buffer*, onde

conseguimos aumentar a razão cíclica do circuito de comando, circuito que foi desenvolvido para este trabalho, sendo uma forma simples de resolver um problema, e que poderá ser usado no futuro.

O conversor Cuk teve seu funcionamento comprovado demonstrando ser uma topologia auto gramepada, e sendo possível o acoplamento de seus indutores tendo como resultado a diminuição da ondulação da corrente na saída. Porém, um dos problemas apresentados foi a grande variação de rendimento, chegando a valores de rendimento próximos a 0,96, ótimos para este tipo de aplicação, e também valores mínimos de 0,49.

Analisando assim, podemos perceber que para tensões até os valores nominais de 16,7V, e razão cíclica 0,42, o conversor teve seu funcionamento melhorado tendo rendimentos acima de 0,83. Porém, ao ser exposto a valores maiores de tensão, que não é o caso em aplicações fotovoltaicas, seu rendimento caiu exponencialmente. Neste aspecto, o comparador com histerese tem um papel importante, dado que apenas quando se é necessário recarregar a bateria, faz-se o uso do conversor.

Assim, através de testes podemos concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados, e que o conversor Cuk pode ser utilizado em uma aplicação fotovoltaica, porém, como se demonstrou, muito oscilatório em termos de rendimento. Assim, pode ser a melhor opção para uma aplicação deste nível.

Uma das alternativas para o mesmo é a troca dos componentes por outros de maior qualidade, bem como o desacoplamento dos indutores, para assim melhorar o rendimento em altas tensões.

## **9. CONCLUSÃO.**

Tendo em vista todos os objetivos traçados e todo o conhecimento adquirido, considera-se que o trabalho teve um imenso proveito, no ponto de vista acadêmico e profissional na formação de um Tecnólogo em Automação Industrial.

As pesquisas realizadas nesse trabalho poderão ser aplicadas a vários campos do conhecimento, relacionados a Automação Industrial, dentre eles, a



Eletrônica, Eletrônica de Potência, Eletrônica Digital, Eficiência Energética, Controle, Análise de Circuitos, Engenharia Elétrica, entre outros

O foco principal se dá na área de Eletrônica de Potência, através da elaboração e projeto do conversor Cuk e análise de sua viabilidade em aplicações remotas, bem como na área de energia renováveis, e a utilização de um controle em malha de tensão na aplicação fotovoltaica.

As simulações por *software* tiveram valores bem próximos aos calculados, apresentando também grandes melhoras por parte do rendimento do conversor, bem como o funcionamento do circuito de comando escolhido e do comparador com histerese. Um ponto a ser mencionado é a oscilação do rendimento, esta que por sua vez teve uma grande mudança de valores. Uma alternativa pode ser de refazer a placa com componentes de melhor qualidade, e refazer os indutores, para que assim o problema seja sanado ou reduzido.

Este rendimento oscilatório não é tão expressivo em termos de aplicação fotovoltaica, sendo que normalmente as aplicações deste âmbito (sistemas remotos), possuem valores de tensão baixos em sua entrada, não ultrapassando os 17V, sendo que para valores baixos o conversor demonstrou um alto rendimento chegando a casa dos 96%.

No mesmo âmbito podemos também analisar o sol como uma fonte “infinita” de energia, ou seja, uma placa receberá muita energia durante todo o dia, que manterá a bateria carregada, tornando a aplicação diferente a de um motor, por exemplo, que apresenta demasiadas perdas, gerando assim gastos financeiros por estar conectado a uma rede elétrica de distribuição.

Concluindo, o trabalho foi proveitoso, demonstrando a funcionalidade do circuito completo.

## **10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

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

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA (EPE). **Projeção da demanda de energia elétrica 2015-2024**. Rio de Janeiro, 2015, 90 p. disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/DEA%2003-2015->

%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202015-2024.pdf> Acessado em set 20. 2016.

ATLAS SOLIMETRICO DO BRASIL. 2000 (ADAPTADO). **Radiação diária – média anual típica**. Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acessado em set 20. 2016.

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.

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/impresso,energia-solar-tem-numeras-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](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.

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

HAYAMA. **Carregadores**. Disponível em: <[http://www.hayama.com.br/index.php/produtos/listar\\_categoria\\_detalhes/8/0](http://www.hayama.com.br/index.php/produtos/listar_categoria_detalhes/8/0)>. Acesso em: 09 set 2015.

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.

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.

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.

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](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](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbateria/pagina_4.asp)>. Acesso em: 08 set. 2015.

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

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

CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. **Esquema dos sistemas não conectados à rede e conectados (grid tie e off grid).**

Disponível em:

<<http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4>>. Acessado em 15 set. 2016.

COMPARADOR COM HISTERESE. **Definição e topologia do comparador com histerese.** Disponível em:

<[http://www.netsoft.inf.br/aulas/4\\_EAC\\_Eletronica\\_Basica/Apoio/exercicios\\_dio\\_dos\\_transistores\\_amplificadores.pdf](http://www.netsoft.inf.br/aulas/4_EAC_Eletronica_Basica/Apoio/exercicios_dio_dos_transistores_amplificadores.pdf)> . Acessado em 10 set. 2016.

SOUZA, CRISTINA. **Baterias**. 2015, Instituto Superior Politécnico de Viseu, disponível em:  
<[http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Controlo\\_carga/baterias.pdf](http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Controlo_carga/baterias.pdf)>. acessado em 12 set. 2016.

COMPONENTES FOTOVOLTAICOS. **Células fotovoltaicas**. Disponível em:  
<[http://www.sunenergy.eco.br/componentes\\_fotovoltaicos.php?menu=energia\\_solar\\_comp](http://www.sunenergy.eco.br/componentes_fotovoltaicos.php?menu=energia_solar_comp)> . Acessado em 9 set. 2016.

FARAGO, ARION DIAS. **Aplicação de um conversor cuk no aproveitamento da energia solar em aplicações remotas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de eletrônica DAELE.2016.

VILLALVA, MARCELO GRADELLA; GAZOLI, JONAS RAFAEL. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.

ONTARIO POWER AUTHORITY – OPA. **Program to conservation and sustainability**. Disponível em: <<http://www.powerauthority.on.ca/conservation>>  
Acessado em 1 set. 2016.