



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**FABIANO LEAL**

**SISTEMAS PARA MELHORIA DE PAINÉIS SOLARES:  
USO DE MLPE PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA**

Palhoça

2022

**FABIANO LEAL**

**SISTEMAS PARA MELHORIA DE PAINÉIS SOLARES  
USO DE MLPE PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de bacharel Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Ms. Jorge Lewis Esswein Jr.

Palhoça  
2022

**FABIANO LEAL**

**SISTEMAS PARA MELHORIA DE PAINÉIS SOLARES  
USO DE MLPE PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 16 de Novembro de 2022.

---

Professor e orientador Ms. Jorge Lewis Esswein Jr.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Prof. Ms Anderson Soares André  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Eng. Marcos Cristiano da Silva  
Discfone Distribuidora

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade de vivenciar esta experiência

Única e por todas as pessoas que colocou em minha vida durante este tempo.

Agradeço à minha esposa Cláudia pelo constante incentivo e apoio durante esse período, bem como a colaboração dos meus filhos Douglas e Amanda, pois sem eles não conseguiria chegar até aqui.

Agradecimento especial ao meu Pai, por ter me feito o homem que sou e por me ajudar na montagem dos equipamentos e na finalização desse trabalho, principalmente na etapa final de testes e montagens.

Aos meus colegas de Universidade e de trabalho por me ajudarem com reflexões e me ajudarem nas horas difíceis.

A todos os meus professores que passaram ao longo da minha formação até hoje, sem vocês o caminho não seria o mesmo. Agradeço de forma especial aos professores Jorge Lewis Esswein Jr. E Francielen Kuball Silva pela orientação e paciência principalmente nesta etapa final.

Ao Prof. Anderson Soares André, pois sem ele não conseguiria embasamento teórico para a produção deste trabalho, a ajuda do meu colega de trabalho, Eng. Marcos Cristiano da Silva e também ao proprietário da empresa, Sr Cláudio Rosseti, que me forneceu os painéis solares e as controladoras de carga para os testes desse projeto.

Em geral agradeço a todos que passaram por minha vida, pois de uma forma ou outra pude aprender algo com vocês.

## RESUMO

Neste trabalho mostrarei a construção de um circuito MLPE, desde o projeto á execução, e abordaremos os tipos de painéis solares, os sistemas em que ele pode ser utilizado e os equipamentos que compõe o sistema fotovoltaico.

Sistemas de energia solar hoje apresentam um rendimento médio de 20% a nível de painel, mas contando-se que o sol é de graça, não existem perdas na distribuição e transmissão o custo fica a cargo dos equipamentos necessários para geração, conversão e no caso de sistemas “*off-grid*”, do armazenamento dessa energia.

Desse modo qualquer aumento de eficiência que se consiga nesses sistemas significa ganho de performance, e é exatamente o que propomos nesse estudo.

O uso de MLPE permite que caso um painel seja sombreado, não cause perda de potência significativa ao sistema como um todo, permitindo maiores rendimentos gerais no sistema.

Neste, mostraremos como o sistema MLPE pode reduzir as perdas em comparação com sistemas sem o dispositivo, além de demonstrar os cálculos do projeto executado.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, energia renovável, conversor *Buck*, MLPE.

## ABSTRACT

*In this work I will show the construction of an MLPE circuit, from design to execution, and we will approach the types of solar panels, the systems in which it can be used and the equipment that makes up the photovoltaic system.*

*Solar energy systems today have an average yield of 20% at panel level, but considering that the sun is free, there are no losses in distribution and transmission, the cost is borne by the equipment needed for generation, conversion and, in the case of of “off-grid” systems, of the storage of this energy.*

*Therefore, any increase in efficiency achieved in these systems means a gain in performance, and this is exactly what we propose in this study.*

*The use of MLPE allows that, if a panel is shaded, it does not cause significant power loss to the system as a whole, allowing greater overall yields in the system.*

*In this, we will show how the MLPE system can reduce losses compared to systems without the device, in addition to demonstrating the calculations of the executed project.*

*Keywords: Photovoltaic systems, renewable energy, Buck converter, MLPE.*

## INDICE DE EQUAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Equação 1-tensão sobre o indutor.....  | 26 |
| Equação 2-corrente no capacitor .....  | 26 |
| Equação 3-tensão sobre o indutor.....  | 27 |
| Equação 4-tensão média sobre o indutor .....   | 27 |
| Equação 5-determinação do ganho estático do conversor.....                               | 27 |
| Equação 6-determinação da potência de entrada.....                                       | 27 |
| Equação 7-equações propositivas conversor <i>buck</i> $V_i V_0 = I_0 I_i = 1D$ .....     | 27 |
| Equação 8-tensão sobre o indutor.....  | 28 |
| Equação 9-corrente sobre o indutor.....  | 29 |
| Equação 10-determinação da corrente máxima e variação de corrente do indutor .....       | 29 |
| Equação 11-determinação do indutor .....   | 29 |
| Equação 12-variação de carga acumulada.....  | 30 |
| Equação 13-variação de carga capacitor .....   | 30 |
| Equação 14-determinação do valor do capacitor.....                                       | 31 |
| Equação 15-determinação do valor do capacitor.....                                       | 31 |
| Equação 16-tensão máxima sobre a chave e o diodo .....                                   | 32 |
| Equação 17:determinação do valor médio sobre a chave.....                                | 32 |
| Equação 18-determinação dos valores de corrente eficazes da chave e média do diodo ..... | 32 |
| Equação 19-corrente eficaz do diodo .....  | 33 |
| Equação 20-valores máximos na chave e no diodo.....                                      | 33 |

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-Painel fotovoltaico de silício monocristalino.....                                   | 15 |
| Figura 2– Painel fotovoltaico silício policristalino.....                                     | 15 |
| Figura 3 – Painel fotovoltaico silício amorfo .....   | 16 |
| Figura 4– Esquema de uma célula fotovoltaica.....   | 17 |
| Figura 5– Esquema de funcionamento de um sistema <i>On Grid</i> .....                         | 19 |
| Figura 6– Esquema de funcionamento de um sistema <i>offgrid</i> .....                         | 19 |
| Figura 7– Crescimento da produção de energia fotovoltaica de 2007-2017 .....                  | 20 |
| Figura 8– Produção de energia fotovoltaica de 2007-2017 por países.....                       | 21 |
| Figura 9- Estrutura do conversor <i>Buck</i> .....  | 25 |
| Figura 10- Etapas de operação a)primeira etapa b)segunda etapa .....                          | 26 |
| Figura 11 -Forma de onda de corrente no indutor .....   | 28 |
| Figura 12 -Formas de onda de corrente e ondulação de tensão no capacitor .....                | 30 |
| Figura 13 -Corrente sobre o indutor .....   | 32 |
| Figura 14-medição de tensão e corrente saída Painel (M1) e saída MLPE (M2) às 08:00 .....     | 36 |
| Figura 15-esquema de ligação de teste do MLPE com apenas uma placa fotovoltaica .....         | 37 |
| Figura 16-teste de curto-circuito na saída-valores de tensão do módulo e da MLPE às 09:00H .. | 38 |
| Figura 17-componente danificado por superaquecimento em caixa fechada.....                    | 38 |
| Figura 18-testes com o circuito reparado .....  | 38 |
| Figura 19-Painéis fotovoltaicos a plena iluminação sobre o telhado .....                      | 39 |
| Figura 20:esquema ligação MLPE com Painel solar em série .....                                | 40 |
| Figura 21-medidas de tensão e corrente com módulos sem sombra .....                           | 40 |
| Figura 22-Sombreamento sobre P1 .....   | 41 |
| Figura 23-medidas com o painel P1 sombreado.....  | 41 |
| Figura 24-Painel fotovoltaico P2 sombreado por objeto .....                                   | 42 |
| Figura 25-medidas com o Painel P2 sombreado .....   | 42 |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                     | <b>11</b> |
| 1.1          | OBJETIVO GERAL.....   | 13        |
| 1.2          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                 | 13        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO TEÓRICA</b> .....                                | <b>14</b> |
| 2.1          | ESTUDO SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....                   | 14        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Célula Fotovoltaica</b> .....                            | <b>14</b> |
| 2.1.1.1      | Silício monocristalino (m-Si) .....                         | 15        |
| 2.1.1.2      | Silício policristalino (p- Si) .....                        | 15        |
| 2.1.1.3      | Silício amorfo .....  | 16        |
| 2.1.1.4      | Filmes finos .....  | 16        |
| <b>2.1.2</b> | <b>Efeito fotovoltaico</b> .....                            | <b>17</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Índice Solarimétrico</b> .....                           | <b>18</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Tipos de sistemas fotovoltaicos</b> .....                | <b>18</b> |
| 2.1.4.1      | Sistemas <i>On Grid</i> ou conectados.....                  | 18        |
| 2.1.4.2      | Sistemas <i>Off Grid</i> ou isolados .....                  | 19        |
| <b>2.1.5</b> | <b>Cenário mundial e nacional</b> .....                     | <b>20</b> |
| 2.2          | O MLPE ( <i>MODULE-LEVEL POWER ELECTRONICS</i> ) .....      | 21        |
| <b>2.2.1</b> | <b>O Conversor <i>Buck</i></b> .....                        | <b>21</b> |
| 2.2.1.1      | Componentes utilizados no projeto .....                     | 22        |
| 2.2.1.1.1    | Circuito integrado PWM .....                                | 22        |
| 2.2.1.1.2    | Diodo(Drl).....   | 22        |
| 2.2.1.1.3    | Indutor (L).....  | 22        |
| <b>3</b>     | <b>MÉTODO</b> .....   | <b>24</b> |
| 3.1          | PROJETO DO CONVERSOR <i>BUCK</i> .....                      | 24        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Dimensionamento do Indutor</b> .....                     | <b>28</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>DIMENSIONAMENTO DO CAPACITOR</b> .....                   | <b>29</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>DIMENSIONAMENTO DOS SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA</b> ..... | <b>31</b> |
| 3.1.3.1      | TENSÃO MÁXIMA SOBRE A CHAVE E O DIODO .....                 | 31        |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 3.1.3.2      | CORRENTE MÉDIA E EFICAZ NA CHAVE.....   | 32        |
| 3.1.3.3      | CORRENTE MÁXIMA NA CHAVE E NO DIODO .....   | 33        |
| <b>4</b>     | <b>IMPLEMENTAÇÃO E TESTES DO PROJETO .....</b>                                    | <b>34</b> |
| 4.1          | IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO .....  | 34        |
| <b>4.1.1</b> | <b>Placa Principal.....</b>   | <b>34</b> |
| 4.1.1.1      | Conversor <i>buck</i> .....   | 34        |
| 4.1.1.2      | Controle de corrente .....  | 35        |
| 4.1.1.3      | Controle de tensão .....  | 35        |
| <b>4.1.2</b> | <b>PLACA DE REALIMENTAÇÃO .....</b>   | <b>35</b> |
| 4.2          | PRIMEIROS TESTES .....  | 36        |
| 4.3          | TESTES COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE .....                                   | 39        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Testes dos painéis Fotovoltaicos sem sombreamento .....</b>                    | <b>39</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Testes dos painéis Fotovoltaicos com sombreamento sobre P1(com MLPE) .....</b> | <b>41</b> |
| <b>4.3.3</b> | <b>Testes dos painéis Fotovoltaicos com sombreamento sobre P2(sem MLPE).....</b>  | <b>42</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>6</b>     | <b>APÊNDICES .....</b>  | <b>47</b> |
| 6.1          | APÊNDICE A – PAINÉIS UTILIZADOS NO PROJETO .....                                  | 47        |
| 6.2          | APÊNDICE B – CONTROLADOR DE CARGA UTILIZADO .....                                 | 49        |

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados de geração de energia no Brasil no ano de 2021 (EPE, 2021) as hidrelétricas foram responsáveis por quase 62,5% de toda energia produzida no país, sendo seguidas pela geração por meio de combustíveis fósseis (gás natural – 8,6%, derivados do petróleo – 1,4% e carvão – 1,9%); biomassa – 9,0%; eólica 9,2%; nuclear – 2,3% e outras - 2.2%. Não é inusitado que essa fonte energética seja a principal fonte geradora de energia do país, tendo em vista a grande abundância do recurso hídrico.

De outro lado a geração elétrica por meio de fontes hídricas apresenta algumas deficiências, primeiramente seguem o mesmo modelo tradicional dos sistemas elétricos de potência - SEP, no que diz respeito a sua forma de geração. Neste modelo tradicional a energia elétrica gerada, é normalmente produzida por grandes usinas localizadas em regiões afastadas das suas cargas. Esta energia é levada então até os centros consumidores por meio de linhas de transmissão e distribuição (ALMEIDA, 2011). A presença destas longas linhas favorece o aumento da quantidade de perdas, diminuindo a eficiência do sistema e afetando a qualidade da energia transmitida. Além disso, ponderando a questão financeira, a produção de energia centralizada requer grandes investimentos, com instalações de enormes proporções, indivisíveis e com pouca flexibilidade (SANTOS; MIGUEL, 2008).

Outra fragilidade das usinas hidrelétricas se trata da dependência dos recursos hídricos chuva, a qual é necessária para manter o nível dos reservatórios para a geração de energia. Esta interdependência já foi propulsora de algumas crises energéticas no país justamente devido à escassez hídrica em um período de crescimento econômico e alta demanda energética (SILVA, 2015), como nos anos de 2001, 2009 e 2015 e 2020. Não deixando de lado é claro, a falta de planejamento dos órgãos responsáveis pelo controle desta geração. Outro efeito causado pela baixa quantidade de recurso hídrico é o aumento tarifário de eletricidade, pois como as hidrelétricas não conseguem atender à demanda energética, a geração é compensada por outras fontes de produtoras de energia, como as termoeletricas, o que causa uma elevação no custo de produção de energia (SILVA, 2015).

Em virtude da pandemia, houve uma retração no consumo de energia devido a- redução da produção industrial e ao uso comercial, mas as perspectivas futuras são de um aumento gigantesco de consumo de energia elétrica com o aumento das demandas pós-pandemia.

Com isso, a demanda energética irá aumentar consideravelmente, sendo assim, necessário a inserção das novas fontes de energia à matriz energética atual para conseguir suprir essa futura demanda.

A energia solar é um meio extremamente limpo e relativamente eficiente para produção de energia elétrica, pois apesar de os painéis terem apenas por volta de 20% de eficiência energética, não há gastos e nem perdas com a distribuição de energia, além do fato de a energia do sol ser gratuita, e as perdas existentes neste sistema influenciam diretamente na quantidade necessária de equipamentos para sua produção (painéis solares).

Como os painéis solares só geram energia enquanto estiverem com iluminação, nos períodos com pouca iluminação ou noturnos é necessário que a energia gerada durante o dia seja acumulada através de baterias, no caso dos sistemas “*off-grid*”, ou enviados à operadora de energia elétrica para futuro abatimento na forma de créditos de energia, no caso dos sistemas “*on-grid*”.

Desse modo qualquer aumento de eficiência que se consiga nesses sistemas significa ganho financeiro, e é exatamente o que propomos nesse estudo.

O uso de MLPE permite que caso um painel seja sombreado, não cause perda de potência significativa ao sistema como um todo, permitindo maiores rendimentos gerais no sistema.

O MLPE é a princípio um sistema para ser usado nos sistemas fotovoltaicos com ligação *String* (onde todos os módulos conectados a MPPT são ligados em série) e o sombreamento de uma pequena parte do sistema série causaria uma elevada resistência nessas células fotovoltaicas, causando a redução na corrente circulante como um todo.

Atualmente são utilizados nos painéis fotovoltaicos diodos, colocados normalmente a cada 9 células, afim de evitar tais perdas de sombreamento, mas ainda assim o painel sombreado apresenta um rendimento muito abaixo do esperado.

O objetivo do projeto é construir um sistema MLPE baseado num conversor *Buck* em modo corrente constante afim elevar a corrente do módulo sombreado ao padrão de um módulo a plena iluminação, salvo em caso de sombreamento de todos os painéis solares.

A priori não nos interessa a tensão, mas manter a corrente estabilizada afim de que o sombreamento da placa não gere uma “resistência” a passagem da corrente de uma *string* inteira, e dessa forma aumentando substancialmente a potência total produzida pelo sistema.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Dimensionar um sistema MLPE a partir de um sistema *Buck* de corrente constante ao nível de plena iluminação dos painéis solares com um equipamento de baixo custo para alta competitividade no mercado solar.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Mostrar os tipos de sistema de geração e topologias de um sistema de geração solar
- b) Projetar um sistema de melhoria á nível de módulo (MLPE).
- c) Montar um sistema de baixo custo (sem o uso de microprocessador).
- d) Uso de componentes baratos mas que dessem performance o suficiente para permitir eficiência razoável á um bom custo.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

O desafio inicial foi executar o projeto de um sistema que conseguisse “manter” a produção de energia de uma *string* de painéis solares, caso uma ou mais células com o sistema fossem sombreadas, permitindo que a produção se mantenha relativamente alta mesmo nessa situação.

O Uso de diodos *bypass* já é bem conhecida e executada em sistemas de energia solar, onde em painéis mais elaborados, a cada 9 células temos um diodo de “*bypass*”, mas neste caso um painel inteiro ou um grupo de células dele ficam sem produção de energia. A colocação dos diodos também gera uma resistência no sistema que causa ainda mais perdas, exatamente o que tentamos evitar com esse projeto.

Utilizando um conversor DC-DC tipo *buck* como base, montamos um sistema MLPE mantendo-se a corrente constante na saída afim de não gerar queda de produção, utilizando-se como base a corrente de máxima potência de um painel fotovoltaico (no nosso caso utilizado um painel solar com capacidade de 4A) e fixando-se a corrente de saída nesse valor, evitando-se que mesmo um dos painéis com baixa produção (fornecendo apenas 2 A por exemplo) faça com que todos os demais painéis da *string* operem com esta corrente.

O conversor *Buck* permite que com a queda da tensão, mantenhamos a corrente desse único painel, e fazendo isso, todas as demais placas solares que estão a plena iluminação continuarão a produzir em sua potência mais elevada.

### 2.1 ESTUDO SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

#### 2.1.1 Célula Fotovoltaica

A célula solar é um dispositivo eletrônico que tem uma função essencial para o sistema fotovoltaico. É dela o trabalho de converter energia luminosa (fótons), do Sol ou de qualquer outra fonte de luz, em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

As células fotovoltaicas são ligadas em série para formação de um módulo ou placa fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

O material mais utilizado nas células é o silício, material semicondutor e segundo mais abundante na crosta terrestre. Existem diversos tipos de células, sendo as principais de silício policristalino, silício monocristalino e de filmes finos (PINHO;GALDINO, 2014).

#### 2.1.1.1 Silício monocristalino (m-Si)

Os painéis de silício monocristalino têm a tecnologia mais antiga e um dos maiores preços disponíveis do mercado devido sua eficiência e pureza do silício, de 99,99% a 99,9999% e por isso tem alta eficiência (RüTHER, 2004). É formado por uma estrutura cristalina homogênea ao longo de todo material (PINHO; GALDINO, 2014). A figura 1 mostra um exemplo da tecnologia.

Figura 1-Painel fotovoltaico de silício monocristalino



#### 2.1.1.2 Silício policristalino (p- Si)

As placas com silício policristalino apresentam uma perfeição menor em comparação à monocristalina, o que as tornam com menor eficiência e menor custo de produção, mesmo tendo o mesmo material como matéria-prima (RüTHER, 2004). Na figura 2 é apresentado um modelo de placa policristalina.

Figura 2– Painel fotovoltaico silício policristalino



Fonte: Calaia (2011).

### 2.1.1.3 Silício amorfo

O silício amorfo não possui estrutura cristalina, apresentando defeitos estruturais e impossibilitando, a princípio, a utilização para placas fotovoltaicas. Porém, ao adicionar hidrogênio, os efeitos negativos são minimizados. Esse processo é denominado hidrogenização. A célula de silício amorfo é a de menor custo, entretanto é a que apresenta menor rendimento elétrico, variando entre 6 a 8% (CALAIA, 2011). A figura 3 mostra um exemplo de módulo de silício amorfo.

Figura 3 – Painel fotovoltaico silício amorfo



Fonte: Calaia (2011).

### 2.1.1.4 Filmes finos

Segundo Calaia (2011), fazendo parte da segunda geração de módulos fotovoltaicos, o painel de filmes finos foi resultado da necessidade de redução do consumo de silício, uma vez que o mesmo possui uma procura maior do que oferta.

Os painéis solares feitos com filmes finos fabricados sobre um substrato de vidro são muito semelhantes aos painéis de vidros, revestidos por películas, muito usados na construção civil. Assim existe perspectiva de aumento da produção e barateamento do produto em curto prazo (RüTHER, 2004).

### 2.1.2 Efeito fotovoltaico

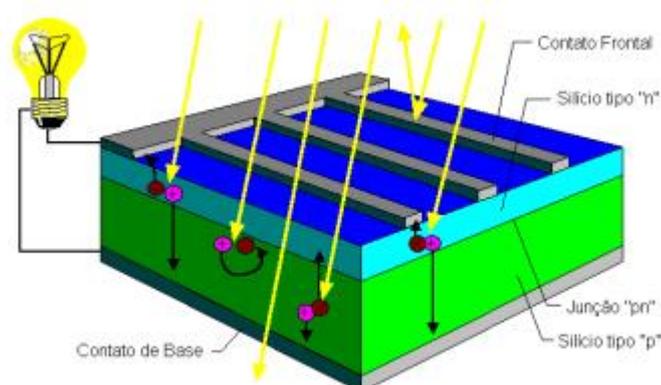
O silício puro é um material que não possui elétrons livres. Para que haja um campo elétrico entre duas placas, é necessária a dopagem desse silício com dois tipos de materiais, que podemos denominar “impurezas” (PINHO; GALDINO, 2014).

É necessário um elemento que torne a ligação com elétrons livres na placa, fazendo com que a mesma possua carga negativa (n), e um segundo elemento que resulte no aparecimento de vazios onde eram para existir elétrons, tornando a placa de carga positiva (p). Esse sistema é chamado de junção p-n. Os elementos mais utilizados nessas dopagens são o fósforo e o boro, que deixam as placas com carga negativa e positiva, respectivamente (RüTHER, 2004).

Essas placas são colocadas entre duas camadas condutoras, uma positiva e uma negativa e entre as placas de silício, uma placa metálica que permite passagem de elétrons apenas do sentido positivo para o negativo, formando uma região de depleção. Com a incidência do fóton proveniente da luz solar, os elétrons podem ser excitados e saírem de suas posições estáveis, o mesmo acontece com os vazios.

Ligando os condutores positivos e negativos tem-se um fluxo de elétrons que é chamado de circuito elétrico. Esse processo é denominado efeito fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014). Pode-se observar um esquema de funcionamento de uma célula solar na figura 4.

Figura 4– Esquema de uma célula fotovoltaica



Fonte: Calaia (2011).

### 2.1.3 Índice Solarimétrico

O índice solarimétrico é responsável por mostrar a incidência solar em determinada localização, para assim obter os alguns parâmetros de dimensionamento de placas solares para o projeto. Cada local possui, além de uma incidência solar específico, um ângulo de posição das placas para que seja aproveitada maior parte da energia que o Sol transmite. Outro fator que é mostrado pelo índice é o fator de incidência mensal, para assim ser feita uma média anual.

Com base em todos esses parâmetros é possível definir, dependendo da proposta, o índice solarimétrico que será usado no projeto. Posteriormente, o ângulo e quantidade de placas a serem colocadas.

O índice solarimétrico da CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica) é representado pela grandeza kWh/m<sup>2</sup>.dia, ou seja, será a quantidade de watts que incidem em uma área de um metro quadrado durante um dia. Este resultado apresenta uma estimativa média anual do índice solarimétrico local.

### 2.1.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Há duas formas de classificar os sistemas fotovoltaicos: *On Grid* e *Off Grid*. A diferença entre os dois influencia na forma de como a energia elétrica é utilizada ou armazenada.

#### 2.1.4.1 Sistemas *On Grid* ou conectados

O sistema *On Grid* é aquele que possui ligação com a rede pública de distribuição de energia elétrica. Uma vez que o sistema fotovoltaico gere mais energia que o utilizado, o excedente é inserido no sistema público, gerando créditos de energia e, conseqüentemente, descontos na conta de luz (SUNERGIA, 2017).

Para implantação dessa tecnologia, são necessários alguns componentes. Um inversor, responsável pela conversão da energia gerada pelas placas em energia que passa pela rede pública, uma vez que o sistema fotovoltaico gera corrente contínua (CC) e a rede pública trabalha com correntes alternadas (SUNERGIA, 2017). Na figura 5 temos uma demonstração do processo *On Grid*.

Figura 5– Esquema de funcionamento de um sistema *On Grid*



Fonte: ECOMAIS (2018).

#### 2.1.4.2 Sistemas *Off Grid* ou isolados

Diferente do sistema conectado, o *Off Grid* não possui ligação com a rede pública. Sendo assim, toda energia excedente gerada é armazenada num banco de baterias, para ser usada posteriormente quando o sistema fotovoltaico não estiver gerando energia. É recomendável utilizar este tipo de sistema em locais onde não há acesso a rede pública. Além das baterias, utilizam-se inversores para transformar corrente contínua em alternada, que é mais comum entre os aparelhos domésticos (SUNERGIA, 2017). Pode-se observar o funcionamento através da figura 6.

Figura 6– Esquema de funcionamento de um sistema *offgrid*



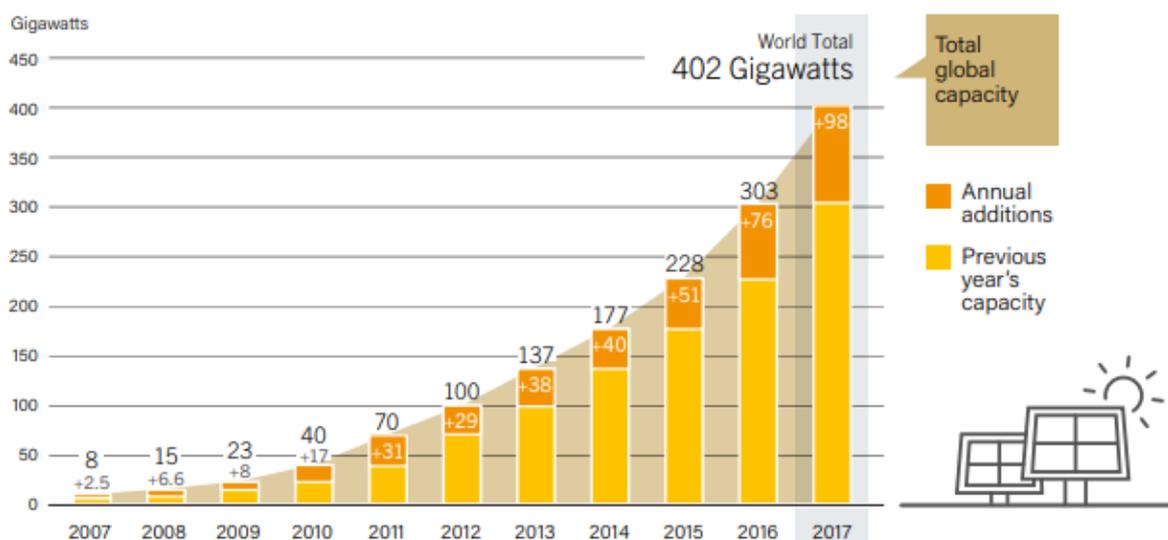
Fonte: ECOMAIS (2018).

### 2.1.5 Cenário mundial e nacional

Apesar da abundância nos recursos solares na Terra, a energia solar para produção de energia elétrica é pouco utilizada em muitos lugares do nosso território.

Apenas alguns países possuem um considerável percentual energético de seu consumo suportado pela energia fotovoltaica. Segundo dados da REN21 a energia solar cresceu exponencialmente nos últimos anos, como mostra a figura 7.

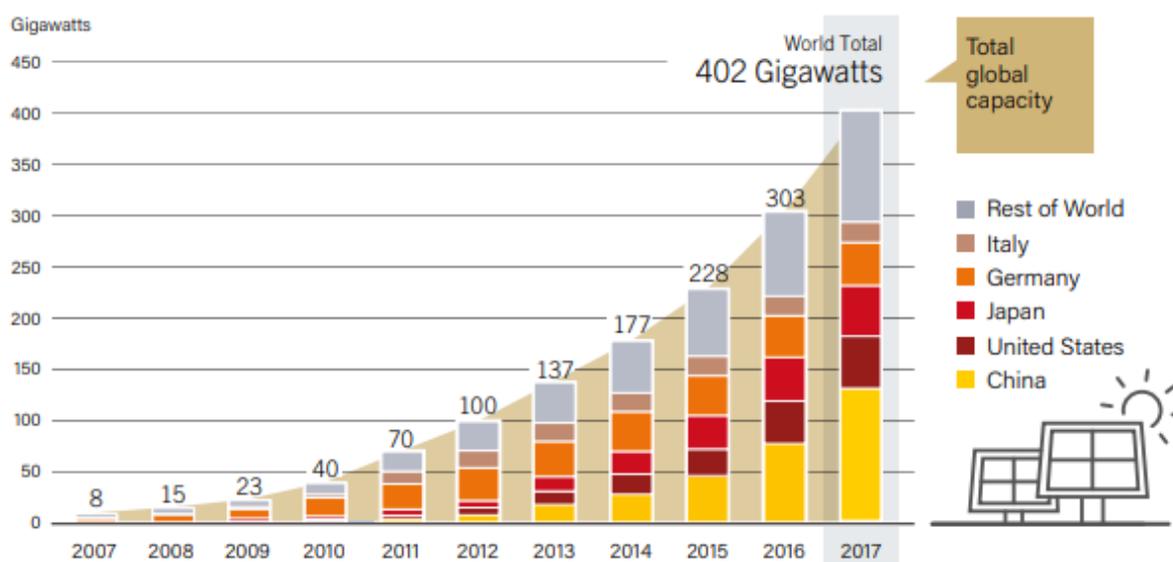
Figura 7– Crescimento da produção de energia fotovoltaica de 2007-2017



Fonte: REN21 (2018).

Embora os dados mostrem um crescimento considerável e promissor da geração de energia proveniente do Sol, o setor ainda é dominado por uma minoria de países, os quais fazem investimentos e incentivos constantes na tecnologia. Essa hegemonia é mostrada na figura 8, onde mostra grande parte da energia fotovoltaica mundial gerada por poucos países desenvolvidos.

Figura 8– Produção de energia fotovoltaica de 2007-2017 por países



Fonte: REN21 (2018).

## 2.2 O MLPE (*MODULE-LEVEL POWER ELECTRONICS*)

O MLPE (*Module-Level Power Electronics*) ou “eletrônica de potência à nível de módulo” é um dispositivo que tem a função de reduzir as perdas geradas pelo sombreamento dos painéis solares, sendo adicionado ao módulo fotovoltaico e a sua principal função é evitar que a perda de iluminação gerada pelo sombreamento faça com que esse painel afete a todos os demais painéis fotovoltaicos reduzindo a intensidade de corrente de toda a *String*.

Logo, a função do MLPE no circuito é manter a corrente do sistema estável mesmo sombreado, evitando-se a redução na produção de energia nos demais painéis da série.

### 2.2.1 O Conversor *Buck*

Observando-se o funcionamento do MLPE, verificou-se que era necessário um circuito que mantivesse estável a corrente do sistema, com baixíssimas perdas e principalmente, fosse um equipamento barato, pois com o aumento da demanda por energia solar, esse seria um equipamento

para usos em locais onde inicialmente não seria possível a implementação de *strings* pelo sombreamento.

Ao observar-se a [equação 7](#), vemos que ao reduzir-se a tensão reduzindo-se o ciclo ativo, consegue-se uma elevação na corrente da carga, ou seja, conseguimos converter a queda de tensão em aumento de corrente. Essa é a base para a construção do nosso circuito MLPE.

## 2.2.1.1 Componentes utilizados no projeto

### 2.2.1.1.1 Circuito integrado PWM

Este componente tem a função de gerar o sinal de alta frequência para o conversor DC-DC, ser a referência do circuito e controlar o funcionamento da fonte em função da tensão ou corrente de referência com relação a saída. Alguns tipos de Controladores PWM já possuem em sua estrutura alguns dos tópicos que estudaremos a seguir, como o chaveador (normalmente um mosfet ou IGBT interno que faz essa função), inclusive esse é o modelo que usaremos em nosso projeto.

### 2.2.1.1.2 Diodo(Drl)

O diodo no circuito é responsável pela condução quando S está em corte, fazendo a corrente circular através do indutor. Esse componente tem características especiais, como alta frequência de chaveamento (tipo recuperação rápida ou *Schottky*) e com a corrente necessária ao projeto (neste caso, superior a corrente de projeto, que abordaremos mais a frente).

Esse diodo serve também como diodo “*bypass*” caso a placa esteja desligada do circuito MLPE, já que o indutor neste circuito se comporta como um curto-circuito para corrente DC.

### 2.2.1.1.3 Indutor (L)

Esse componente é crítico no projeto, já que ele é responsável pelo armazenamento de energia na forma de campo magnético, e o seu mal dimensionamento gerará perdas extras ao sistema, como aquecimento (por fiação mal dimensionada) ou por poucas ou muitas espiras (ocasionando resistência mais elevada ou campo insuficiente para as correntes e tensões parâmetros do projeto).

#### 2.2.1.1.4 Capacitor( C)

Esse componente tem a função de armazenar a tensão em suas armaduras para ser posteriormente utilizado pelo circuito e manter tanto a tensão como a corrente para a carga o mais estável possível dentro de um limite de projeto, para que as oscilações do PWM não sejam transmitidas para a carga.

### 3 MÉTODO

O trabalho tem como objetivo o projeto de um sistema MLPE, demonstrando as vantagens e também as possíveis desvantagens e condições ideais de emprego do dispositivo e quantificar o rendimento (ou a melhora do rendimento do sistema) com o seu uso.

A idéia principal é executar o projeto do protótipo, e a partir disso, a utilização prática do dispositivo em conjunto com uma *string* de painéis solares, efetuar as medidas elétricas necessárias do conjunto com o MLPE e sem, com o intuito de comparar o sistema com o dispositivo e seu par de referência sem o dispositivo e podendo dessa forma saber o ganho efetivo do sistema.

O método comparativo será utilizado nesse trabalho, onde utilizaremos 2 painéis solares de 80W ligados em série, e em um dos painéis será utilizado a MLPE produzida e a outra não, sombreando o painel com o dispositivo para identificar através dos instrumentos ligados, as diferenças de geração do sistema com e o sistema espelhado sem o dispositivo, nas mesmas condições de iluminação ambiente.

A corrente máxima desses painéis (dados de datasheet do painel Solarbo 80M-SF-S, de 80W potência máxima, de conforme anexo A) é de 4 Ampères e desse modo, a corrente do MLPE foi estipulada nesse valor, para que mesmo em modo de sombreamento o sistema mantenha a corrente estável.

Uma retroalimentação do painel solar permite que aumentemos a eficiência, pois o painel solar, com o aumento da carga acima de sua potência máxima, faz a tensão do painel cair, reduzindo a sua eficiência.

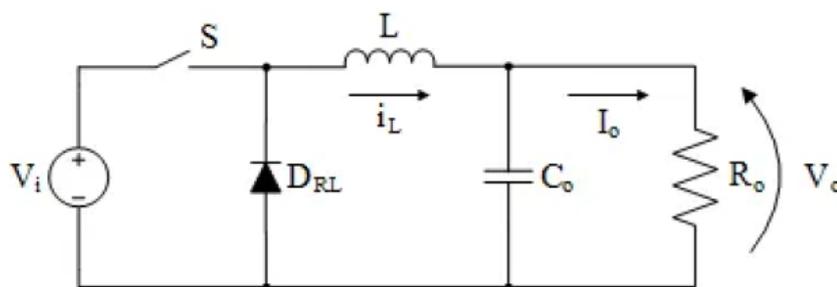
#### 3.1 PROJETO DO CONVERSOR *BUCK*

O conversor *Buck* é comumente utilizado em modo tensão constante, pois controlando-se o ciclo de operação do PWM consegue-se facilmente controlar a tensão. Neste caso específico, o que se deseja é manter a corrente fixa, independente da tensão de entrada e de saída (modo corrente constante) e isso permite o uso no projeto.

Esse tipo de conversor foi escolhido pois com a queda de tensão, ocorre um aumento na corrente da carga, permitindo que o balanço de potência do painel solar se mantenha mesmo com o aumento da corrente. Outro motivo para o uso desse circuito é a sua simplicidade, já que com poucos componentes consegue-se um circuito estável e com poucas perdas.

No momento em que a chave entra em condução, o diodo fica reversamente polarizado, e a fonte passa a transferir energia para o indutor ( $i_L$  cresce) e para o capacitor e a carga (quando o capacitor carrega,  $i_L$  diminui).

Figura 9- Estrutura do conversor *Buck*

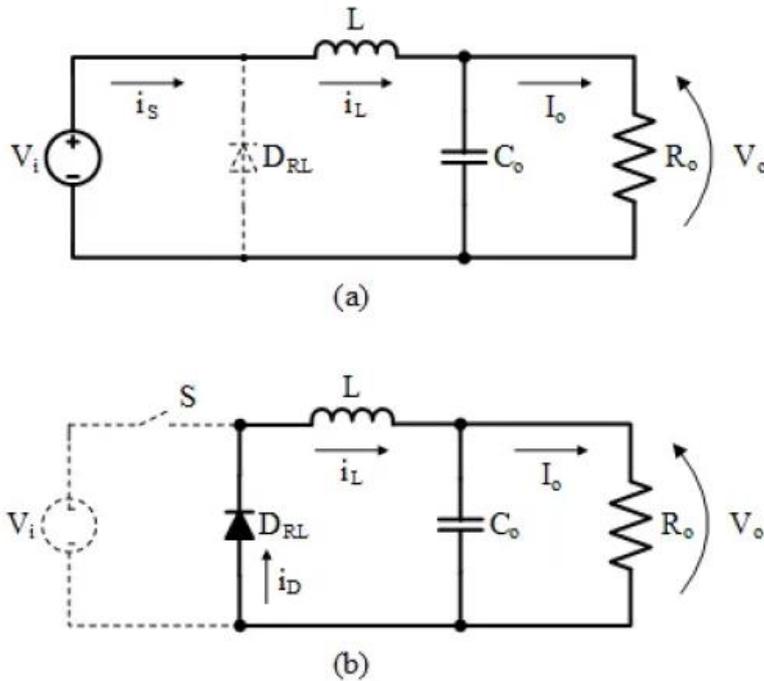


Quando S bloqueia, o diodo  $D_{RL}$  entra naturalmente em condução fornecendo passagem à corrente do indutor. Com isso, a energia armazenada no indutor é, então, entregue ao capacitor e à carga ( $i_L$  diminui).

Enquanto o valor instantâneo da corrente no indutor for maior que a corrente de carga, a diferença carrega o capacitor. Caso contrário, o capacitor se descarrega suprindo a diferença para manter a corrente de carga constante.

A operação em modo de condução contínua do conversor *Buck* resulta em duas etapas de funcionamento, que estão representadas pelos circuitos equivalentes da Figura 10. Seja  $D$  a razão cíclica e  $T$  o período de chaveamento, a primeira etapa tem duração de  $t = D.Ts$  e a segunda de  $t_a = (1s - D).Ts$ .

Figura 10- Etapas de operação a)primeira etapa b)segunda etapa



Quando a chave está em condução o indutor fica conectado entre a fonte de alimentação de entrada e o capacitor de saída. Considerando a aproximação por baixa ondulação, a tensão no indutor e a corrente no capacitor neste subintervalo são dadas por:

Equação 1-tensão sobre o indutor

$$v_L = V_i - V_o$$

Equação 2-corrente no capacitor

$$i_C = i_L - I_o = i_L - \frac{V_o}{R_o}$$

Durante a segunda etapa, um dos terminais do indutor é conectado ao terra do circuito, como se verifica na Figura 10. A tensão no indutor e a corrente no capacitor valem:

Equação 3-tensão sobre o indutor

$$vL = -V_0$$

Pelo princípio da conservação de energia, sabe-se que a tensão média sobre o indutor em regime permanente é nula, logo:

Equação 4-tensão média sobre o indutor

$$\frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} vL dt = (V_i - V_0) * D - V_0 * (1 - D)$$

Assim:

Equação 5-determinação do ganho estático do conversor

$$(V_i - V_0) * D = V_0 * (1 - D)$$

$$\therefore \frac{V_0}{V_i} = D$$

A Equação 5 representa o ganho estático do conversor.

Sendo o conversor ideal, então a potência de entrada é igual a de saída. Isto é:

Equação 6-determinação da potência de entrada

$$P_i = P_0 \rightarrow V_i * I_i = V_0 * I_0$$

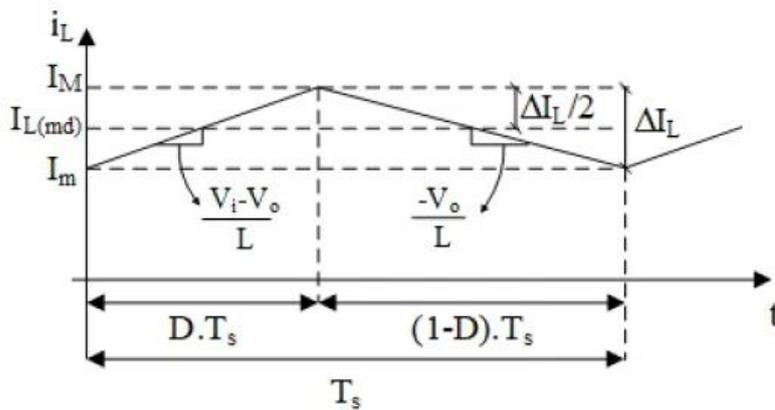
Logo:

Equação 7-equações propositivas conversor *buck*

$$\frac{V_i}{V_0} = \frac{I_0}{I_i} = \frac{1}{D}$$

Desse modo, conclui-se que a relação entre a corrente de saída e a corrente de entrada é inversa, quando comparada à relação das tensões (ganho estático). Isto faz sentido devido à conservação de energia no sistema, que faz com que a potência de saída seja igual a de entrada. Portanto, se a tensão é menor na saída, a corrente deverá ser maior para manter a potência constante.

Figura 11 -Forma de onda de corrente no indutor



### 3.1.1 Dimensionamento do Indutor

durante a primeira etapa de operação, sabe-se que a tensão no indutor vale:

Equação 8-tensão sobre o indutor

$$vL = L * \frac{di_L}{dt} = Vi - Vo$$

Sendo assim, a expressão no tempo que descreve a corrente é dada pela Equação 10, onde  $I_m$  representa a corrente mínima.

Equação 9-corrente sobre o indutor

$$i_L = \frac{V_i - V_o}{L} * t + I_m$$

Com base na Figura 11, observa-se que a corrente máxima (IM) ocorre em  $t = D.T_s$ . Logo,

Equação 10-determinação da corrente máxima e variação de corrente do indutor

$$I_M = \frac{V_i - V_o}{L} * D.T_s + I_m$$

$$\Delta I_L = I_M - I_m = \frac{V_i - V_o}{L} * D.T_s$$

Por fim, isolando L na expressão anterior, obtém-se a Equação 11 que permite determinar o valor do indutor para uma dada ondulação de corrente.

Equação 11-determinação do indutor

$$L = \frac{(V_i - V_o) * D}{f_s * \Delta I_L}$$

Convém salientar que no conversor *Buck* a corrente média no indutor é igual à corrente média de saída. Além disso, no modo de condução contínua, podemos considerar a aproximação por baixa ondulação na corrente, o que permite aproximar o valor eficaz pelo próprio valor médio.

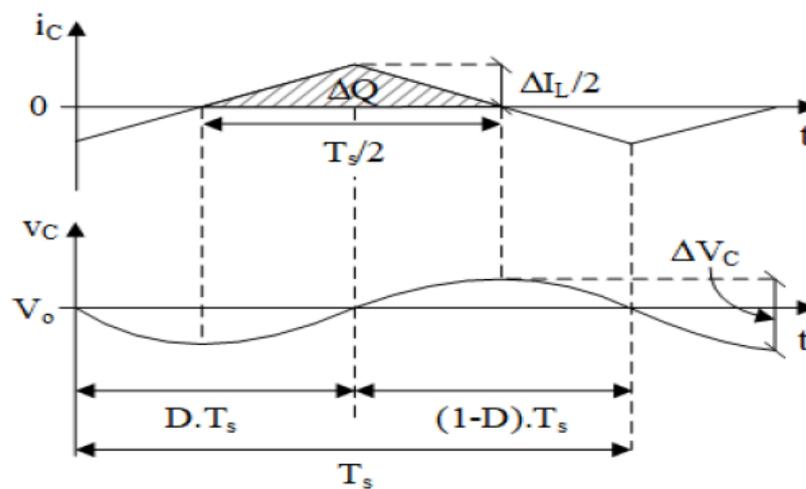
### 3.1.2 DIMENSIONAMENTO DO CAPACITOR

O uso da aproximação por baixa ondulação na tensão facilita a análise do circuito, mas dificulta o projeto do capacitor no caso dos conversores que possuem um filtro LC de saída. O

problema é que a corrente que circula no capacitor é unicamente a componente CA da corrente no indutor, logo não é possível negligenciar a ondulação desta corrente para o projeto do mesmo.

Na verdade, sabe-se que a corrente no indutor é composta de um valor médio  $I_L$ , mais um ondulação linear, cujo valor de pico-pico vale  $\Delta I$ . O valor médio é entregue totalmente à carga, enquanto que a ondulação se divide entre o capacitor e a carga. Entretanto, se o capacitor for bem projetado, de modo que sua impedância na frequência de chaveamento seja muito menor que a impedância da carga, pode-se considerar que a ondulação da corrente no indutor passa apenas pelo capacitor.

Figura 12 -Formas de onda de corrente e ondulação de tensão no capacitor



Observa-se que quando a corrente no capacitor é positiva, o capacitor é carregado e sua tensão cresce do mínimo até o máximo. Esta variação na tensão pode ser relacionada à variação da carga acumulada, segundo a Equação 12

Equação 12-variação de carga acumulada

$$\Delta Q = C * \Delta V_C$$

Ao mesmo tempo, pode-se definir a carga como a integral da corrente no tempo, que neste caso equivale à área destacada na Figura 12. Ou seja,

Equação 13-variação de carga capacitor

$$\Delta Q = \frac{1}{2} * \frac{\Delta I_L}{2} * \frac{T_S}{2} = \frac{\Delta I_L * T_S}{8}$$

Levando-se a equação 12 em 13, obtém-se:

Equação 14-determinação do valor do capacitor

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 * f_S * L * \Delta V_C}$$

Equação 15-determinação do valor do capacitor

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 * f_S^2 * L * \left(\frac{\Delta V_C}{V_0}\right)}$$

### 3.1.3 DIMENSIONAMENTO DOS SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

O projeto dos semicondutores, sejam eles chaves (normalmente MOSFETs ou IGBTs) ou diodos, é outro passo importante para garantir um bom funcionamento do conversor. Como veremos em artigos específicos sobre estes elementos, os parâmetros mais importantes a serem obtidos são: a máxima tensão e a máxima corrente que eles devem suportar, a corrente média no caso dos diodos ou IGBTs, e a corrente eficaz no caso dos MOSFETs. Estes últimos parâmetros são necessários para o cálculo das perdas por condução.

#### 3.1.3.1 TENSÃO MÁXIMA SOBRE A CHAVE E O DIODO

A tensão máxima sobre a chave é determinada quando esta se encontra bloqueada durante a segunda etapa, e corresponde ao valor da fonte de alimentação, como se pode verificar pelo

circuito equivalente da Figura 10. A análise para o diodo resulta no mesmo valor. Então, pode-se escrever a seguinte relação.

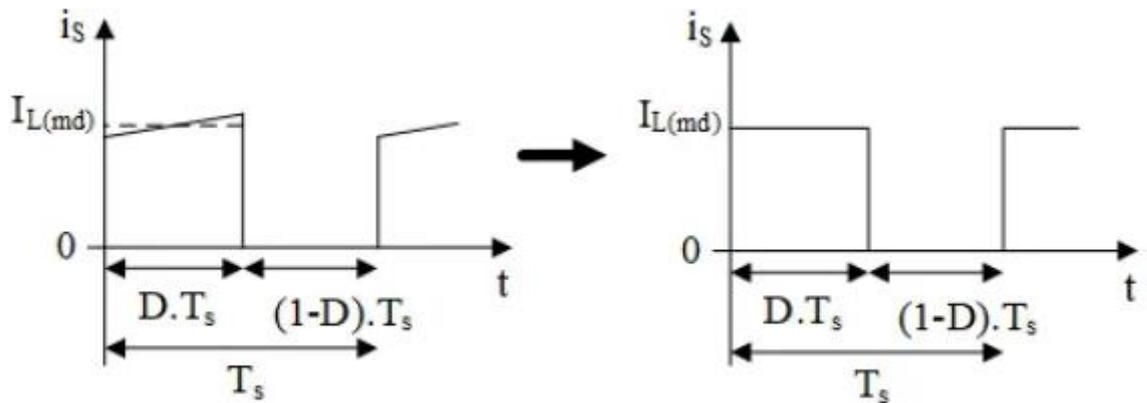
Equação 16-tensão máxima sobre a chave e o diodo

$$V_S(\max) = V_D(\max) = V_i$$

### 3.1.3.2 CORRENTE MÉDIA E EFICAZ NA CHAVE

Para o cálculo dos valores médio e eficaz da corrente na chave, vamos considerar a aproximação por baixa ondulação, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 -Corrente sobre o indutor



Sendo assim, o valor médio da corrente vale:

Equação 17:determinação do valor médio sobre a chave

$$I_{s(\text{med})} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_s dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} I_{L(\text{med})} dt = D * I_{L(\text{med})}$$

E o valor eficaz:

Equação 18-determinação dos valores de corrente eficazes da chave e média do diodo

$$I_{s(\text{ef})} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_s^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} I_{L(\text{med})}^2 dt} = \sqrt{D} * I_{L(\text{med})}$$

$$\begin{aligned}
 I_{d(med)} &= \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} i_{D(t)} dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{(1-D)T_S} I_{L(med)} dt \\
 &= (1 - D) * I_{L(med)}
 \end{aligned}$$

E para a corrente eficaz:

Equação 19-corrente eficaz do diodo

$$\begin{aligned}
 I_{d(ef)} &= \sqrt{\frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} i_D^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_S} \int_0^{(1-D)T_S} i_{L(med)}^2 dt} = \\
 &\therefore I_{D(ef)} = \sqrt{1-D} * I_L
 \end{aligned}$$

### 3.1.3.3 CORRENTE MÁXIMA NA CHAVE E NO DIODO

Corrente no indutor. Dessa forma, pela análise da forma de onda da Figura 4, obtém-se facilmente o valor de pico da corrente no indutor, que equivale ao valor de pico da corrente no interruptor e no diodo. Este valor é dado por:

Equação 20-valores máximos na chave e no diodo

$$I_{S(max)} = I_{D(max)} = I_{L(med)} + \frac{\Delta I_L}{2}$$

Sendo assim, finalizamos a análise do conversor *Buck* em regime permanente, operando no modo de condução contínua. Com as expressões obtidas é possível projetar perfeitamente este tipo de conversor.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES DO PROJETO

### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

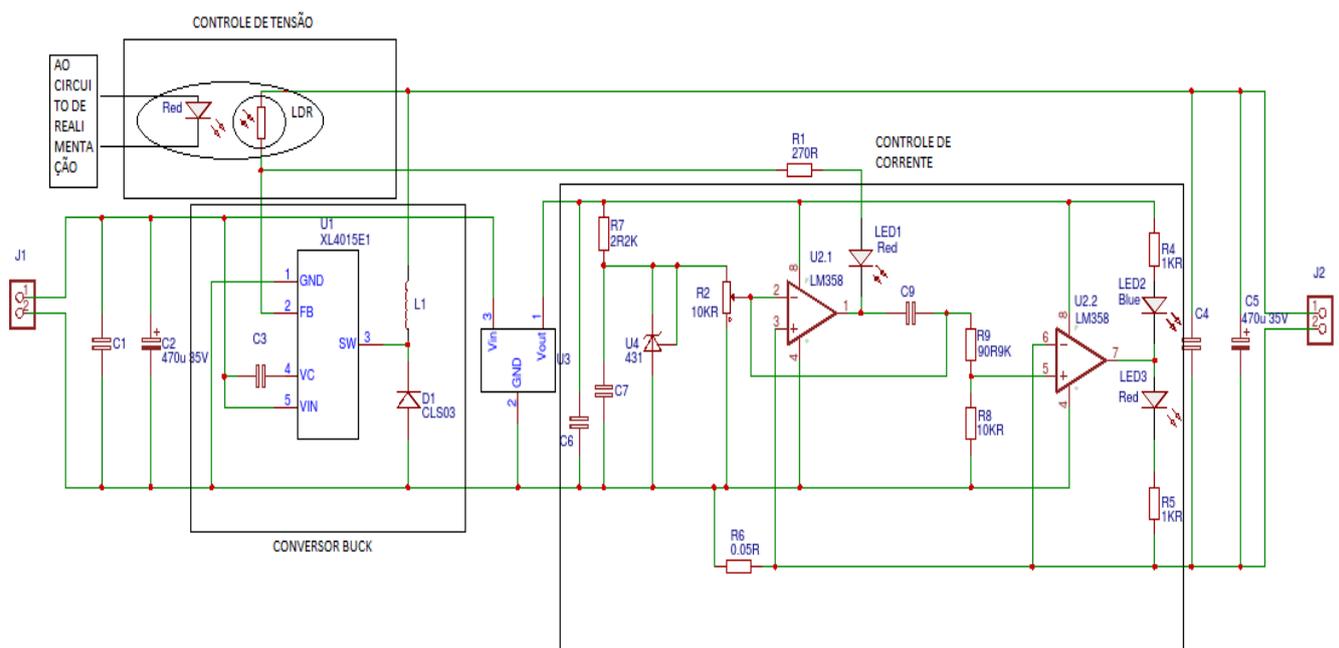
#### 4.1.1 Placa Principal

O projeto inicial foi implementado com um circuito PWM dedicado, usando o XL4015E, com capacidade máxima de tensão de 40V e corrente de 5A, e integra um mosfet internamente e todo o circuito de estabilização, facilitando em muito o trabalho.

Abaixo temos o circuito principal, com os circuitos PWM, controle de tensão e controle de corrente que utilizar em nosso projeto para fazer os ajustes necessários.

Figura 14-esquema da placa principal dividida em blocos

Na sequência uma explicação rápida sobre os blocos.



##### 4.1.1.1 Conversor *buck*

Este circuito é o responsável pelas “conversões” dos níveis de tensão e corrente em que abordamos na fase de projeto e permite que quando reduzimos a tensão tenhamos uma elevação diretamente proporcional da corrente, e vice-versa.

#### 4.1.1.2 Controle de corrente

Esse circuito é o responsável por manter a corrente do projeto relativamente estável e dependente do ajuste do potenciômetro R2, e no nosso caso, regulamos para uma corrente pouco superior á de curto-circuito do módulo, que no nosso caso é 4,05A, ajustamos para 4,2A.

#### 4.1.1.3 Controle de tensão

Esse circuito é essencial para o funcionamento do nosso projeto, pois o ajuste de tensão de saída permite, através do circuito de realimentação, que veremos mais adiante o controle dos níveis do PWM, de modo que quando a tensão caia excessivamente no painel solar a saída terá uma redução na tensão, afim de aumentar a corrente na saída e trazer o circuito de volta á estabilidade.

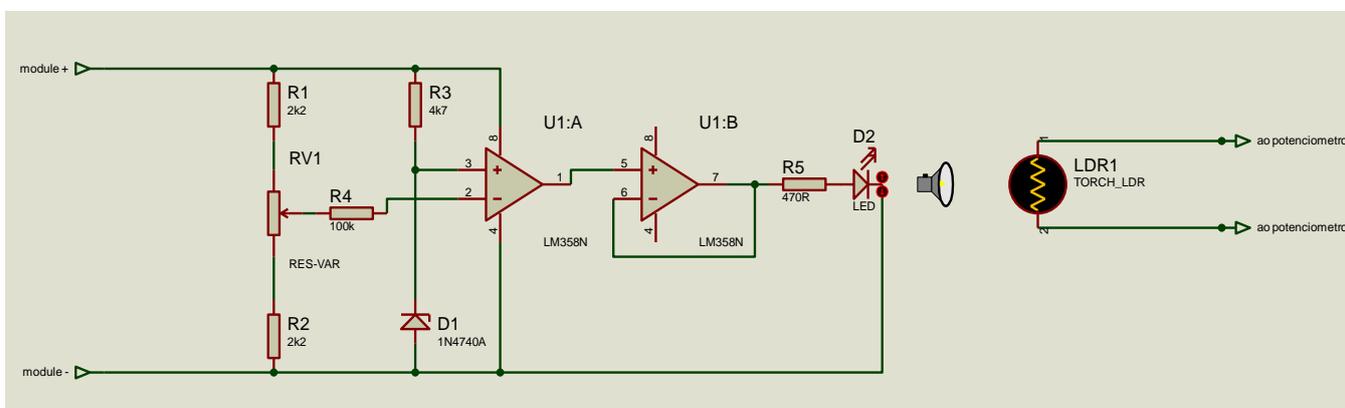
### 4.1.2 PLACA DE REALIMENTAÇÃO

Este circuito é o responsável por manter uma potência elevada no painel solar, permitindo que o circuito PWM tenha uma elevada tensão na entrada e uma redução na saída, mas com isso temos um aumento geral na potência fornecida pelo módulo, pois o PWM não reduzirá a tensão no painel solar, e essa tensão mais alta será convertida pelo circuito *buck* em uma corrente mais elevada na saída final do circuito, melhorando o ganho de potência entre 5 e 33%.

Essa “potência extra” é essencial nesse circuito em que queremos uma melhoria no rendimento do painel solar, permitindo que mesmo em situação de albedo ou sombreamento do painel tenhamos uma corrente fixa na saída.

Abaixo está a representação gráfica do circuito de realimentação.

Figura 15:circuito de realimentação



O potenciômetro RV1 permite regular manualmente a tensão de MPP (*maximum power point*) e esse ajuste é crítico, pois um valor muito baixo de tensão pode não gerar potência suficiente, assim como muito acima.

A utilização de R4 permite que na mudança de tensão do comparador ocorra uma rampa, fazendo com que o led acenda e aumente o brilho com a queda de tensão sobre o painel fotovoltaico e alterando o brilho do led D2 o valor de resistência do LDR(resistor dependente de luz) cai, fazendo com que a tensão no conversor *buck* caia e mantenha a tensão estável na entrada do módulo Fotovoltaico, enquanto aumenta o limite de corrente até o máximo estipulado pelo circuito, no nosso caso em 4A.

## 4.2 PRIMEIROS TESTES

Foi montado um protótipo para a execução dos testes, num primeiro momento, ligada com apenas uma placa fotovoltaica para a verificação de funcionamento e estabilidade do circuito, além das verificações referentes aos níveis de tensão na placa e aos níveis de corrente de saída do circuito.

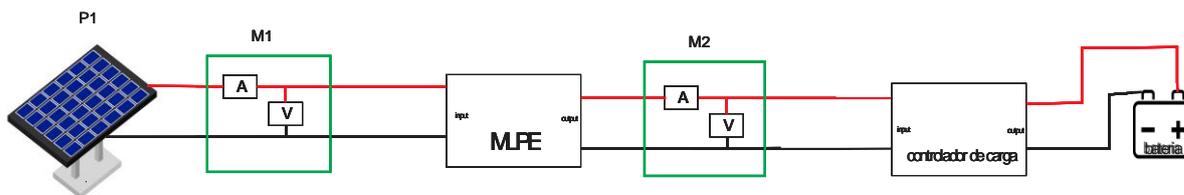
Com a placa a plena iluminação, foi feita a regulagem do potenciômetro para a tensão de 19v, tensão de MPP do módulo fotovoltaico.

Após a ligação a bateria com meia carga, fiz as medidas de tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico e de saída para a bateria 12V.

Figura 14-medição de tensão e corrente saída Painel (M1) e saída MLPE (M2) às 08:00



Figura 15-esquema de ligação de teste do MLPE com apenas uma placa fotovoltaica



Foi observada uma tensão de placa fotovoltaica em M1 de 18,74V e uma corrente de 2,911A totalizando 54,55W gerados pelo painel, e na saída a tensão era de 13,47V com uma corrente de 3,52A em M2, totalizando 47,41W, demonstrando o “ganho” de corrente enquanto houve uma queda na tensão, mas houve nesse caso uma pequena queda na potência total, causada pelas perdas por aquecimento do conversor *buck*, principalmente e da energia usada para o funcionamento dos medidores.

O rendimento ficou acima 86,91%, pois ainda não descontamos a potência perdida pelos medidores.

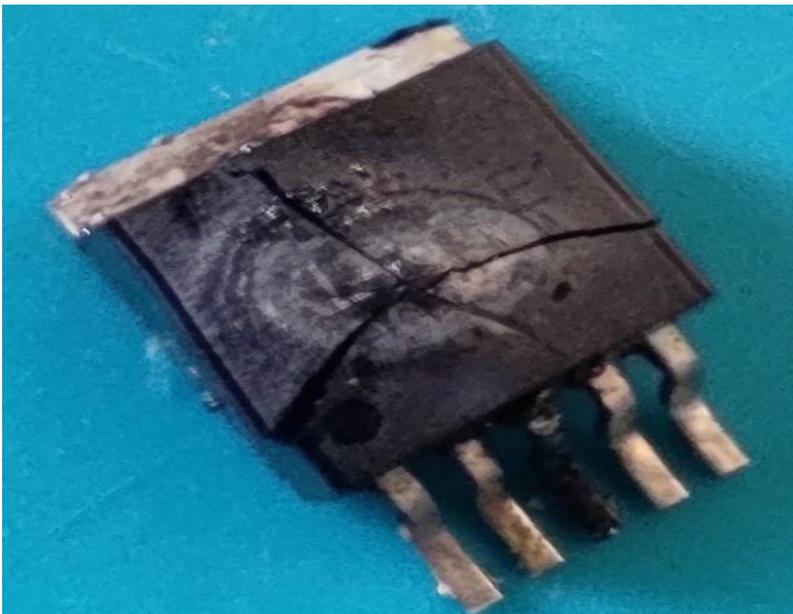
Depois foi retirada a bateria, e fechado um curto-circuito na saída do circuito, a corrente ficou estável em 4,27A na saída enquanto a tensão na entrada ficou em 22,2V e com uma corrente de 360 mA.

Figura 16-teste de curto-circuito na saída-valores de tensão do módulo e da MLPE às 09:00H



Após os testes foi identificado um aquecimento considerável na placa pois ela estava encerrada em uma caixa plástica fechada e com pouca ventilação, e após algum tempo de funcionamento ocorreu a queima do circuito chaveador por esse superaquecimento.

Figura 17-componente danificado por superaquecimento em caixa fechada



Reparei a placa e identifiquei que tanto o PWM (XL4015, com capacidade para 5A), como o diodo (s03) estavam danificados, e fiz a substituição. Troquei o XL4015 original do circuito pelo XL4016(com capacidade para 8A) e o diodo por um MBR1640(com capacidade para 16 A.)

Fiz mais alguns testes com a placa reparada e esse foi o resultado á luz do sol das 11h:

Figura 18-testes com o circuito reparado



obtivemos na entrada 20,77V corrente de 3,98A , o que nos dá uma potência de 66,42W, e na saída temos 13,62V por 4,425A, uma potência de 60,27W e um rendimento com a nova configuração de 90,73%.o pequeno ganho deveu-se ao fato de o diodo original ser um diodo rápido, e o que coloquei foi um diodo *schottky*, com menor queda de tensão, e melhor rendimento que o original. Isso demonstra como pequenas mudanças no projeto podem melhorar o desempenho.

Então resolvi colocar as placas e circuitos em uma caixa metálica ventilada e com ventoinha para evitar que um novo superaquecimento ocorresse.

Após esses testes, ficou claro que temos um circuito funcional e de baixo custo, que cumpre as premissas iniciais desse projeto

### 4.3 TESTES COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM SÉRIE

Com o circuito em plenas condições de funcionamento, partimos para a etapa de testes, que foi dividida conforme o tipo de sombreamento feito nos painéis.

#### 4.3.1 Testes dos painéis Fotovoltaicos sem sombreamento

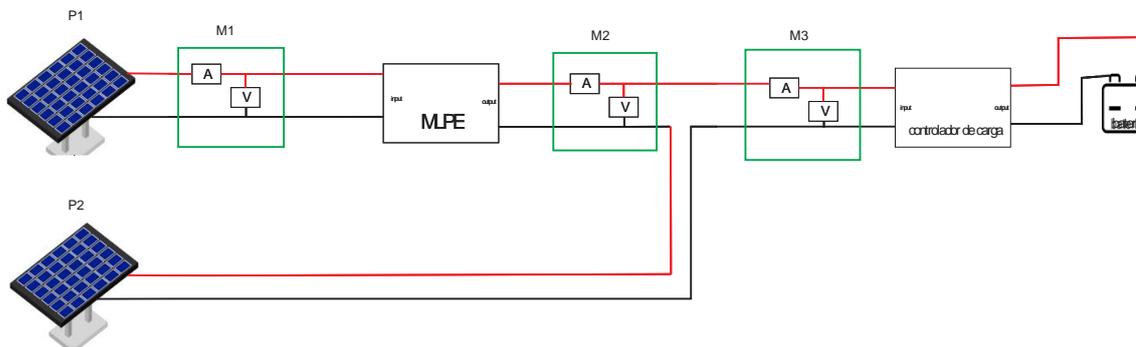
Neste teste, fiz a ligação dos painéis fotovoltaicos em série, com o circuito proposto conectado a um dos painéis e a mesma inicialmente com iluminação total e depois com uma das placas sombreada e esse mesmo teste repetido em um segundo conjunto de placas sem o circuito para Servir de referência aos nossos testes.

Figura 19-Painéis fotovoltaicos a plena iluminação sobre o telhado



As placas foram ligadas como no esquema abaixo:

Figura 20:esquema ligação MLPE com Painel solar em série



Onde M1 são os medidores de tensão e corrente de entrada do MLPE, M2 são os medidores de tensão e corrente de saída do MLPE e M3 são os medidores de tensão e corrente de entrada para o controlador de carga. Neste caso o controlador de carga e as baterias são para 24 V. P1 e P2 são os painéis fotovoltaicos, para referência.

Figura 21-medidas de tensão e corrente com módulos sem sombra



Observe nesse caso que a corrente do MLPE está acompanhando a corrente de Curto-circuito do painel P2, já que a tensão sobre o Painel 2 é  $PM3-PM1=26,8-13,75=13,05V$ .

A potência ganha é dada pela diferença de tensão do  $PM2=13,75V-13,05=0,7V$  multiplicado pela corrente  $M2=4,421A$ , gerando uma otimização de 3,1W nessa placa.

Aqui vemos um pequeno ganho do modulo P1 com o MLPE pois como a corrente é a mesmo no circuito de saída do MLPE (M2), mas como temos um pequeno ganho de tensão em M2

Isso acontece pois o controlador de carga que utilizamos é no padrão PWM e temos uma perda maior nessa placa sem o otimizador pois está trabalhando numa tensão bem abaixo, de 13,05V, enquanto o painel P1 a tensão medida por M1 é de 18,35V.

#### 4.3.2 Testes dos painéis Fotovoltaicos com sombreamento sobre P1(com MLPE)

Aqui temos o sombreamento do painel P1(direita da imagem) enquanto P2 recebe irradiação direta.

Figura 22-Sombreamento sobre P1



Após foi feito o sombreamento do painel com o MLPE P1, e foram obtidas as seguintes medições:

Figura 23-medidas com o painel P1 sombreado



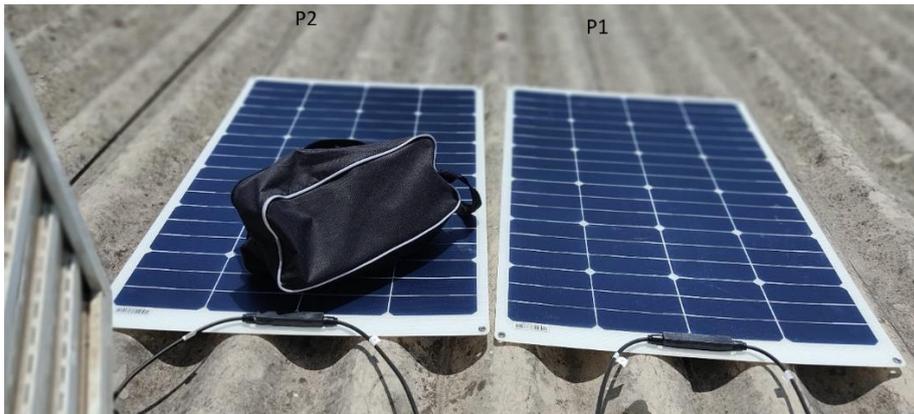
Observe que houve uma grande perda na produção do Painel P1, medido por M1, mas o MLPE conseguiu manter a corrente nominal de 3,25 A (no momento da medida houve uma pequena redução da luminância causada por nuvens), mas as diferenças de tensão e corrente entre M1 e M2 são enormes, onde temos nesse momento a redução de tensão de M1 para M2 de

10,784V,  $PM2 = M2(V) * M2(I) = 7,296V * 3,291A = 24,011W$ , enquanto a corrente de M1 para M2 cresceu de 1,563 A para 3,291 A, minimizando as perdas de P2, mantendo a potência dele de como  $26,5 - 7,3 = 19,2V * 3,291A = 63,19W$

#### 4.3.3 Testes dos painéis Fotovoltaicos com sombreamento sobre P2(sem MLPE)

Neste caso foi gerado o sombreamento sobre P2, conforme mostra a figura abaixo

Figura 24-Painel fotovoltaico P2 sombreado por objeto



Após foi feito o sombreamento do painel sem o MLPE P2, e foram obtidas as seguintes medições:

Figura 25-medidas com o Painel P2 sombreado



Neste caso, como o painel P2 (sem o MLPE) estava sombreado, tanto a tensão como a corrente baixaram bastante no painel P2-neste caso  $=M3-M2=26,4-19,2=7,22V$ , enquanto a corrente é a mesma de  $M2=2,75A$ , o que nos dá uma potência de  $7,22V*2,75A=19,855W$ .

Já na saída do MLPE (M2), temos  $19,18V*2,75A=52,745W$ .

Observe que mesmo com o sombreamento de P2, a corrente do sistema inteiro baixou, reduzindo o rendimento do sistema, mas o MLPE acompanhou a corrente da placa P2, pois era ela quem detinha o maior valor de resistência no sistema devido á redução da luz em algumas células.

## 5 CONCLUSÃO

Através dos dados obtidos do funcionamento do MLPE sob condições diversas, conseguimos concluir que, apesar de não termos uma MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) o Projeto sugerido conseguiu o objetivo inicial de estabilização da corrente de saída.

Manter o módulo fotovoltaico o mais próximo possível do ponto MPPT pelo nível de tensão do mesmo foi um desafio, pois em várias situações de iluminação, em que mantínhamos a corrente elevada, a tensão era insuficiente para o funcionamento do circuito *buck*, resolvido através do circuito de realimentação, permitindo estabilizar a tensão do módulo e o *buck* mantendo a corrente de saída constante e próximo ao nível de maior corrente do módulo em questão, e mesmo com o módulo sombreado, conseguimos obter o máximo das demais placas do sistema.

Os testes feitos foram além de uma situação normal de sombreamento por obstáculos externos como outras construções, que normalmente deixam uma iluminação de albedo suficiente para o funcionamento do circuito, onde sombreamos a placa por completo com uma bolsa, que deixava várias células do painel completamente escuras, aumentando ainda mais a Resistividade do painel.

Um fator que gerou diferenças nas medidas é que os painéis solares, por sofrerem influência direta da iluminação, dependiam diretamente das condições das nuvens, horários dos testes, e até a refletância relativa de objetos, como paredes, influenciavam na potência geral, sendo outro grande desafio pois os testes nem sempre foram feitos no mesmo horário.

## REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 06 de out. 2021.

ANEEL.no sistema elétrico nacional–prodíst. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2013. 43

ANEEL.Resolução\_normativa\_nº\_867.

Disponíveis em<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>,\_2015. 31, 36, 41

ANEEL,C.T.Micro e minigeração distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc, 2014. 35

MOÇAMBIQUE,N.E.M. Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e Controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos. Tese (Doutorado)—Universidade de São Paulo,2012. 8, 9

EPE-Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021- ano base 2020.

Mammano, Robert (5 de setembro de 1999). «*Switching power supply topology voltage mode vs. current mode.*» (PDF). Unitrode. Consultado em 07 de novembro de 2021

Keeping, Steven (8 de maio de 2012). «*Understanding the Advantages and Disadvantages of Linear Regulators*». DigiKey. Consultado em 2 de setembro de 2021. Arquivado do original em 07/10/ 2021

BARBI, I. Projetos de fontes chaveadas. 2.ed. Florianópolis: Ed. Do Autor, 2007. 334.

CALAIA, F. J. Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas: Estudo experimental com transposição para um nível macro. [S.l.: s.n.], 2011.

PINHO; GALDINO. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. [S.l.]:GTES, 2014.

RüTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. 1. ed.[S.l.]: UFSC/LABSOLAR, 2004.

CALAIA, F. J. Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas: Estudo experimental com transposição para um nível macro. [S.l.: s.n.], 2011.

PORTAL SOLAR. TOP 7 Países que mais usam energia solar. 2017.Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/top-7-paises-que-mais-usam-energia-solar.html>>. Acesso em: 06/10/ 2021

REN21. RENEWABLES 2018: Global status report. [S.l.: s.n.], 2018.

SUNERGIA. Qual a diferença entre sistemas *On-Grid* e *Off-Grid*. 2017. Disponível em: <<https://sunergia.com.br/blog/qual-a-diferenca-entre-sistemas-on-grid-e-off-grid/>>.Acesso em: 28/09/2021

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. 2015.Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>.

SLOA049B – Application note texas.

HART, D. W. “Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos”. 1ª Edição, AMGH Editora Ltda. Porto Alegre, 2012.

POMILIO, J. A. “Topologias Básicas de Conversores CC-CC”. [online]. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap3.pdf>>.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. “*Fundamentals of Power Electronics*”. 2ª Ed. New ork, 2004.-

## 6 APÊNDICES

### 6.1 APÊNDICE A – PAINÉIS UTILIZADOS NO PROJETO



#### SOLARBO-80M-SF-S



#### Módulo Fotovoltaico Monocristalino, Semi Flexível, 24 células - 80 Wp

O módulo fotovoltaico monocristalino semi flexível SOLARBO-80M-SF-S oferece excelente custo benefício na geração de energia solar. Portátil, compacto, leve e flexível. É fabricado com as exclusivas células solares de altíssima eficiência SunPower. Mantendo o rigoroso padrão Solarbo de qualidade, todos os módulos são testados individualmente. Segurança e qualidade aliadas a 5 anos de garantia de desempenho (no mínimo 80% de seu desempenho nominal).

- Flexibilidade de até 50 graus
- Eficiência do módulo de até 17,6 %
- Grau de proteção (caixa de junção) IP67
- Alta eficiência e durabilidade
- Garantia de 2 ano de produto

#### ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

|   |   |
|---|---|
| Modelo  | SOLARBO-80M-SF-S                            |
| Registro INMETRO  | Registro 000904/2021 (Portaria n° 004/2011) |
| <b>PERFORMANCE EM STC<sup>1</sup></b>   |   |
| Potência máxima   | 80 W +/- 5 %                                |
| Tensão máxima de operação   | 20,80 V                                     |
| Corrente máxima de operação   | 3,85 A                                      |
| Tensão de circuito aberto   | 24,28 V                                     |
| Corrente de curto circuito  | 4,05 A                                      |
| Eficiência do módulo  | 17,6 %                                      |
| <sup>1</sup> Sob Condições Padrão de Teste (STC): irradiância de 1000 W/m <sup>2</sup> , AM de 1,5 e temperatura do módulo de 25°C. |   |

#### ESPECIFICAÇÕES MECÂNICAS

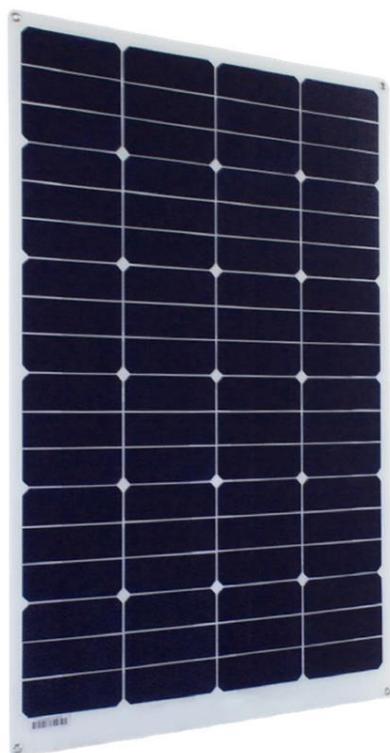
|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Tipo de célula                     | Monocristalino   |
| Dimensões das células              | 125 x 125 mm   |
| Dimensões do módulo (A x L x P)    | 840 x 540 x 3 mm   |
| Número de células                  | 24 (4 x 6)   |
| Peso                               | 1,7 kg   |
| Diodos Bypass                      | 1  |
| Comprimento do cabo                | 500 mm   |
| Seção transversal do cabo          | 4 mm <sup>2</sup>  |
| Conector                           | Compatível com MC4   |
| Grau de proteção (caixa de junção) | IP67   |
| Fixação                            | Com adesivos e/ou uso de ilhós de aço inoxidável no módulo |



#### CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| Temperatura de operação    | -40°C à +85°C |
| Tensão máxima do Sistema   | 45 Vcc        |
| Corrente máxima do fusível | 15 A          |

#### FOTOS DO PRODUTO



## 6.2 APÊNDICE B – CONTROLADOR DE CARGA UTILIZADO



## SOLARBO-1024-PWM-WP-L

**Controlador de Carga Off Grid PWM**

O controlador de carga é o dispositivo utilizado para gerenciar e controlar o processo de carga e descarga do banco de bateria(s). Instalado entre o módulo fotovoltaico e a(s) bateria(s), protege, otimiza e prolonga a vida útil da(s) bateria(s).

- Tecnologia PWM
- Para carregamento de baterias de e chumbo ácido
- Fácil instalação
- Grau de proteção IP67
- Identificação automática de tensão do sistema (12 V ou 24 V)
- Garantia de 1 ano de produto

## ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

|   |  |
|---|--|
| Modelo  | SOLARBO-1024-PWM-WP-L                                      |
| Potência nominal                                | 120 W (sistema 12 V); 240 W (sistema 24 V)                 |
| Máxima tensão de entrada do painel fotovoltaico | < 24 V (sistema 12 V); < 55V (sistema 24 V)                |
| Máxima corrente de carregamento de bateria      | 10 A   |
| Tipo de bateria                                 | Chumbo ácido inundada (padrão), selada e gel               |
| Tensão do sistema (bateria)                     | Reconhecimento automático 12 V / 24 V                      |
| Proteção contra sobretensão                     | 16 V (sistema 12 V); 32 V (sistema 24 V)                   |
| Tensão de carregamento de equalização (Equal)   | 14,8 V (sistema 12 V); 29,6 V (sistema 24 V)               |
| Tensão de carregamento rápido (Boost)           | 14,5 V (sistema 12 V); 29,0 V (sistema 24 V)               |
| Tensão de carregamento de flutuação (Float)     | 13,7 V (sistema 12 V); 27,4 V (sistema 24 V)               |
| Reconexão de baixa tensão (LVR) (ajustável)     | 11,4 ~ 12,8 V (sistema 12 V); 22,8 ~ 25,6 V (sistema 24 V) |
| Desconexão de baixa tensão (LVD) (ajustável)    | 10,8 ~ 11,8 V (sistema 12 V); 21,6 ~ 23,6 V (sistema 24 V) |
| Coefficiente de compensação de temperatura      | -3,0 mV / °C / 2 V   |
| Autoconsumo                                     | < 10mA   |
| Temperatura de operação                         | -35 °C à +60 °C  |
| Seção transversal dos cabos                     | 2,5 mm <sup>2</sup>  |
| Grau de proteção                                | IP67   |
| Peso líquido                                    | 190 g  |
| Dimensões (L x A x P)                           | 82 x 68 x 18,6 mm  |

FOTOS DO PRODUTO

