



Ministério da Educação  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia de Controle e  
Automação



# **BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID**

RAFAEL PEDROSA DE OLIVEIRA

Ouro Preto MG  
2019

RAFAEL PEDROSA DE OLIVEIRA

# BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

**Orientador:** Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

**Coorientador:** MSc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira

Ouro Preto - MG  
Julho de 2019

O482b Oliveira, Rafael Pedrosa.  
Bancada didática para sistema fotovoltaico OFF-GRID [manuscrito] /  
Rafael Pedrosa Oliveira. - 2019.

32f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.  
Coorientador: Prof. MSc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas  
Fundamentais.

1. Material didático - Bancada Didática. 2. Sistemas de energia  
fotovoltaica . 3. Energia solar - Sistema off-grid. I. Monteiro, Paulo Marcos de  
Barros. II. Ferreira, Diógenes Viegas Mendes. III. Universidade Federal de Ouro  
Preto. IV. Título.

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br) CDU: 658.5

Monografia intitulada "Bancada didática para sistema fotovoltaico off-grid" defendida e aprovada, em 12 de julho de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



---

MSc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira - Coorientador



---

Prof. Dr. Wolmar Araújo Neto – Professor Convidado

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Hélio (in memoriam) e Esmeralda.*

# Agradecimentos

Agradeço ao meu pai Hélio (*in memoriam*) por tentar me passar toda sua experiência adquirida em anos de trabalho, pelos conselhos de qual caminho seguir e seu apoio incondicional. A dona Esmeralda, minha mãe, não foi fácil esse caminho, tenho de agradecer todo seu carinho e compreensão, sem vocês não conseguiria concluir essa caminhada!

Não posso deixar de fazer uma menção aos meus irmãos de sangue, Robson e Raquel, assim como, aos meus irmãos da vida, os moradores e ex-alunos da República Favela. Ao Philipe e ao Elder, pelas conversas nos momentos difíceis.

Por fim, agradecer aos professores do Departamento de Controle e Automação-DECAT, em especial aos professores Dr.Paulo Monteiro, Dr.Luiz Rispoli, MSc. Diógenes Viegas e ao Dr. Wolmar Araújo e a gloriosa Escola de Minas!

*"A grandeza existe para aqueles que desejam ser grandes"*

*Caio Carneiro.*

# Resumo

Devido à crescente demanda de energias renováveis, a fabricação de células solares e instalações fotovoltaicas avançou consideravelmente nos últimos anos, alcançando a marca de 40GW (gigawatts), segundo a Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica. Além disso, o Brasil possui um enorme potencial para produção de energia fotovoltaica. Nesse trabalho foi desenvolvido uma bancada didática para que várias grandezas relacionadas a energia fotovoltaica sejam analisadas, como: tensão, corrente gerada e carga da bateria. O material de apoio produzido poderá ser utilizado em diversas disciplinas ministradas no Laboratório de Automação Predial, para ilustrar melhor o funcionamento desse tipo de energia, bem como no desenvolvimento de outras pesquisas. Sendo possível deslocar o protótipo desenvolvido para demonstrações em escolas, feiras de ciência etc. a fim divulgar esta tecnologia.

**Palavras-chave:** Bancada Didática, Sistema Fotovoltico, Sistema *off-grid*.



# Abstract

Due to the growing demand for renewable energies, solar cells and photovoltaic plants have advanced considerably in recent years, reaching 40GW (gigawatts), according to the European Association of Photovoltaic Industry. In addition, Brazil has enormous potential for photovoltaic energy production. In this work, a teaching stand was developed so that several variables related to photovoltaic energy can be analyzed, such as: voltage, generated current and battery charge. The support material produced can be used in several disciplines taught at the Laboratory of Building Automation to better illustrate the operation of this type of energy, as well as in the development of other researches. It is possible to move the prototype developed for demonstrations in schools, science fairs etc. in order to disclose this technology.

**Keywords:** Teaching Stand, Photovoltaic Plants, Off-Grid System.

# Lista de figuras

Figura 1 – Layout de um sistema <i>off-grid</i> . . . . .	4
Figura 2 – Espectro da radiação solar . . . . .	5
Figura 3 – Estruturas moleculares dos semicondutores P e N . . . . .	6
Figura 4 – Materiais semicondutores em três situações diferentes . . . . .	7
Figura 5 – Processo Czocharalski . . . . .	8
Figura 6 – Célula de silício monocristalino . . . . .	9
Figura 7 – Célula de silício policristalino . . . . .	10
Figura 8 – Célula de silício amorfo . . . . .	11
Figura 9 – Associação em série de células fotovoltaicas . . . . .	12
Figura 10 – Curva característica I x V de uma célula de silício . . . . .	13
Figura 11 – Curva típica de potência versus tensão . . . . .	13
Figura 12 – Parâmetros de máxima potência . . . . .	14
Figura 13 – Influência da radiação solar na operação do módulo . . . . .	15
Figura 14 – Influência da temperatura na operação de um módulo fotovoltaico . . . . .	15
Figura 15 – Módulo fotovoltaico sobre o efeito de uma sombra . . . . .	16
Figura 16 – Módulo Fotovoltaico com sombra em uma célula com diodo by-pass . . . . .	16
Figura 17 – Curva característica do módulo com sombreamento . . . . .	17
Figura 18 – Modo de utilização do controlador de carga . . . . .	18
Figura 19 – Controlador PWM . . . . .	19
Figura 20 – Operação do módulo com o controlador MPPT . . . . .	20
Figura 21 – Orçamento CDE 2019 . . . . .	21
Figura 22 – Lista de componentes do projeto . . . . .	23
Figura 23 – Caixa de proteção(StringBox) . . . . .	24
Figura 24 – Inversor de Frequência DAK 1000W . . . . .	24
Figura 25 – Controlador de carga MPPT Epsolar . . . . .	25
Figura 26 – Telhado Fotovoltaico . . . . .	26
Figura 27 – Bancada Didática . . . . .	27
Figura 28 – Fitas de LED alimentadas pelo telhado fotovoltaico . . . . .	28
Figura 29 – Lâmpadas 127V com diferentes temperaturas de cor . . . . .	29

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação de diversas células fotovoltaicas com eficiência medida em laboratório com irradiância de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e $25^\circ\text{C}$ . . . . .	11
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DECAT	Departamento de Engenharia de Controle e Automação
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
SIN	Sistema Interligado Nacional
CCC	Conta de Consumo de Combustíveis
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
ISA	Instituto Socioambiental
TIX	Território Indígena do Xingu
LpT	Luz para Todos
CC	Corrente Contínua
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
W	Watt
$W_p$	Watt-pico
LED	Light Emitting Diode
V	Volt
eV	Elétron-Volt

# Lista de símbolos

$\eta$  Letra grega eta

$\Lambda$  Lambda

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>2</b>
<b>1.1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>2</b>
<b>1.1.4</b>	<b>Organização do Texto</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Efeito fotovoltaico</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Células Fotovoltaicas</b>	<b>7</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Monocristalinas</b>	<b>8</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Silício Policristalino</b>	<b>9</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Filmes Finos</b>	<b>10</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Comparação entre a tecnologias</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Funcionamento dos módulos fotovoltaicos</b>	<b>11</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Características dos módulos</b>	<b>12</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Curva característica I x V</b>	<b>13</b>
<b>2.5</b>	<b>Fatores que afetam o funcionamento dos módulos</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Irradiância</b>	<b>14</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Temperatura</b>	<b>15</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Sombreamento</b>	<b>16</b>
<b>2.6</b>	<b>Baterias</b>	<b>17</b>
<b>2.7</b>	<b>Controlador de Carga</b>	<b>18</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Principais tipos de controlador de carga</b>	<b>18</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Controlador Eletrônico com PWM</b>	<b>19</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Controlador MPPT</b>	<b>19</b>
<b>2.8</b>	<b>Inversor</b>	<b>19</b>
<b>2.9</b>	<b>Sistemas Autônomos</b>	<b>20</b>
<b>2.9.1</b>	<b>Projeto Xingu Solar</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Seleção dos componentes do sistema</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>27</b>

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> . . . . .	<b>30</b>
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>31</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

A Energia Solar Fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável, obtida através da conversão da radiação solar em energia elétrica. Este tipo de energia usa-se para alimentar inúmeros aplicativos e aparelhos autônomos, para abastecer refúgios ou moradias isoladas da rede elétrica e para produzir eletricidade a grande escala através de redes de distribuição.

Devido à crescente demanda de energias renováveis, a fabricação de células solares e instalações fotovoltaicas avançou consideravelmente nos últimos anos, alcançando a marca de 40GW (gigawatts), segundo a Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica. Além disso, o Brasil possui um enorme potencial para produção de energia fotovoltaica, uma vez que, de acordo com o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais 2012, o país apresenta valores de insolação diária entre 4500Wh/m<sup>2</sup> (watt-hora por metro quadrado) e 6000Wh/m<sup>2</sup>, sendo estes valores muito superiores aos valores da maior produtora mundial, Alemanha, que apresenta uma insolação média de 3500Wh/m<sup>2</sup>. Aliado aos valores elevados de insolação no território brasileiro, o investimento inicial para aquisição de sistema de geração residencial teve uma queda significativa, tendo uma redução do valor investido por Watt de \$7,36/W em 2010, para \$2,8/W em 2017 (FU et al., 2017).

Os sistemas de geração distribuída, aqueles em que o consumidor possa gerar sua própria energia, somam 81MW de potência instalada, distribuído em cerca de 7,7mil unidades produtoras (ANEEL, 2019). O número atual, ainda é insignificante, mas segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, produzido pelo Ministério de Minas e Energia, a produção de energia fotovoltaica será de 3,3GWp, correspondendo em cerca de 0,6% do total nacional. Esse aumento pode favorecer principalmente comunidades que não são atendidas pelo Sistema Interligado Nacional-SIN.

Os Sistemas Isolados, são definidos como um sistema de serviço público de distribuição de energia elétrica desconectados do SIN. Atualmente, mais de 3 milhões de pessoas são atendidas dessa forma, sendo que 97% utiliza geradores a diesel, para suprir a demanda. O que causa uma emissão de 3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Tendo em vista que os custos de manutenção e operação desses serviços é de obrigação da distribuidora, milhões de reais são dispendidos em compra de combustível (IEMA, 2019a). Uma alternativa para o atual sistema de geração, são micro-usinas de geração fotovoltaica, que está sendo empregado em algumas comunidades indígenas, pois permitem uma produção limpa e silenciosa.

O grande entrave para a utilização em regiões isoladas, é a necessidade de capacitação dos membros da comunidade para operação e manutenção do sistema de geração. Segundo o relatório disponibilizado pelo IEMA 2019b “o oferecimento de cursos sobre sistemas solares no âmbito do



projeto desenvolvido pelo ISA fez com que representantes das aldeias tenham familiaridade com o projeto desses tipos de sistemas, mesmo que de forma ainda inicial.”, ainda no mesmo relatório é citado o tempo de implementação de um sistema e o curso de formação: “Nas aldeias onde os sistemas solares ainda não foram instalados, os alunos dos cursos de formação afirmam que o elevado intervalo de tempo entre aulas e a disponibilidade da tecnologia na aldeia fez com que o conhecimento tenha sido perdido, uma vez que não foi possível colocar em prática os novos aprendizados.”. A bancada didática proposta nesse trabalho de conclusão de curso, visa atender essa necessidade de instruir os alunos sobre um sistema de geração isolado. O uso de tecnologia para auxiliar no ensino pode ser defendido pela obra, *A sociedade em rede*, de Manuel Castells, que afirma que "a tecnologia é a sociedade, e a sociedade não pode ser entendida ou representada sem suas ferramentas tecnológicas"(CASTELLS et al., 2007).

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Esse trabalho tem como objetivo a criação de uma bancada didática para que várias grandezas sejam analisadas, como: tensão, corrente gerada e carga da bateria. Ademais, esse material de apoio poderá ser utilizado nas diversas disciplinas ministradas no LAP, para ilustrar melhor o funcionamento desse tipo de energia, bem como no desenvolvimento de outras pesquisas. Este protótipo poderá ser deslocado para demonstrações em escolas, feiras de ciência etc. a fim divulgar esta tecnologia.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão dos principais aspectos do sistema de geração fotovoltaica;
- Implementar um sistema de testes da bancada utilizando a estrutura do Laboratório de Automação Predial.
- Fazer um estudo sobre as vantagens e desvantagens de sistemas de geração isolados.

### **1.1.3 Justificativa**

O Laboratório de Automação Predial, possui um sistema de micro geração de energia fotovoltaica, mas não possuía uma ferramenta de auxílio para o ensino desse tipo de matriz energética. Além disso, o desenvolvimento foi motivado pela existência de uma grande quantidade de pessoas que ainda não são atendidas por uma rede do sistema nacional de distribuição e com isso, precisam ser atendidas por sistemas isolados, que são objetivo de estudo desse trabalho.

### **1.1.4 Organização do Texto**

Este trabalho esta composto da seguinte maneira:

O Capítulo 1 uma breve abordagem sobre energia elétrica no Brasil, energia solar, os objetivos que levaram a produção desse trabalho.

O Capítulo 2, apresenta uma fundamentação teórica dos principais conceitos abordados no trabalho. Trazendo aspectos dos sistemas fotovoltaicos, on-grid e off grid e dos problemas enfrentados por comunidades isoladas para geração de energia.

O Capítulo 3, apresenta a metodologia utilizada para implementar o trabalho.

O Capítulo 4, demonstra o resultado da construção da bancada , apresentando suas funcionalidades.

O Capítulo 5, contém a conclusão do trabalho assim como a sugestão de trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O sistema desconectado a rede(off-grid), são aqueles em que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é armazenada em um banco de baterias para uso posterior. Os principais componentes de um sistema off-grid são os painéis fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores de frequência. (GHAFOOR; MUNIR, 2015). A Figura 1, apresenta o diagrama de funcionamento desse sistema.

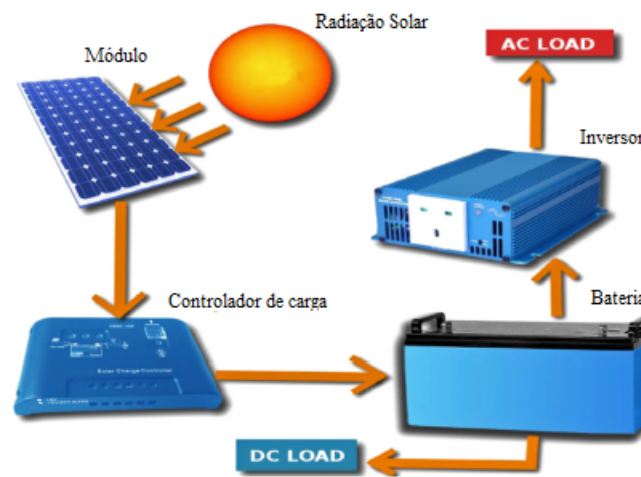


Figura 1 – Layout de um sistema *off-grid*

Fonte: (GHAFOOR; MUNIR, 2015)

### 2.2 Efeito fotovoltaico

O funcionamento das células solares se baseia no efeito fotovoltaico que foi observado pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel. Ele verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. O avanço dessa tecnologia dependeu de desenvolvimentos no campo científico e, principalmente, da explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905 (VALLÊRA; BRITO, 2006). A energia que uma onda pode transmitir, está associada à sua frequência. A equação 2.1 é conhecida como equação de Planck-Einstein, que mostra a relação entre a frequência e energia de uma onda eletromagnética (VILLALVA, 2015).

$$E = h \times f \quad (2.1)$$

Onde,

$E$  = Energia da onda (expressa em joules[J] ou elétron-volt[eV])

$f$  = Frequência expressa em Hertz [Hz].

$h$  = Constante de Planck, que vale aproximadamente  $6,636.10^{-34}$ [J.s].

O comprimento de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional a sua frequência. A equação 2.2, relaciona a frequência, o comprimento de onda e a velocidade da onda eletromagnética.

$$c = \lambda \times f \quad (2.2)$$

Onde,

$c$  =Velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 300.000km/s)

$\lambda$  = É o comprimento da onda [m].

$f$  = É a frequência da onda [Hz].

O espectro da radiação solar, Figura 2 é o conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol.

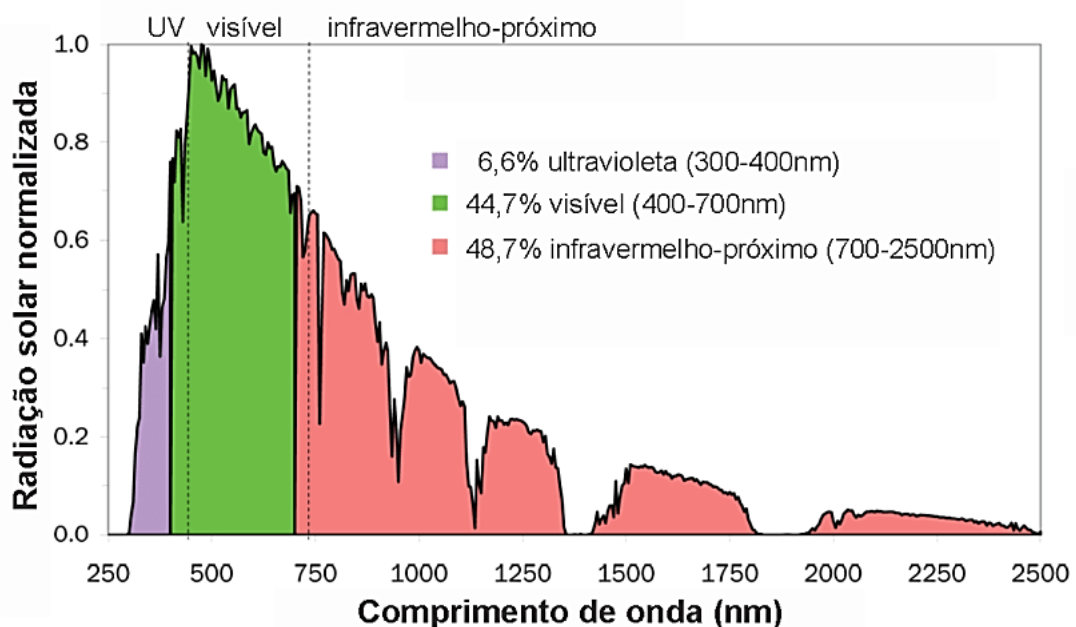


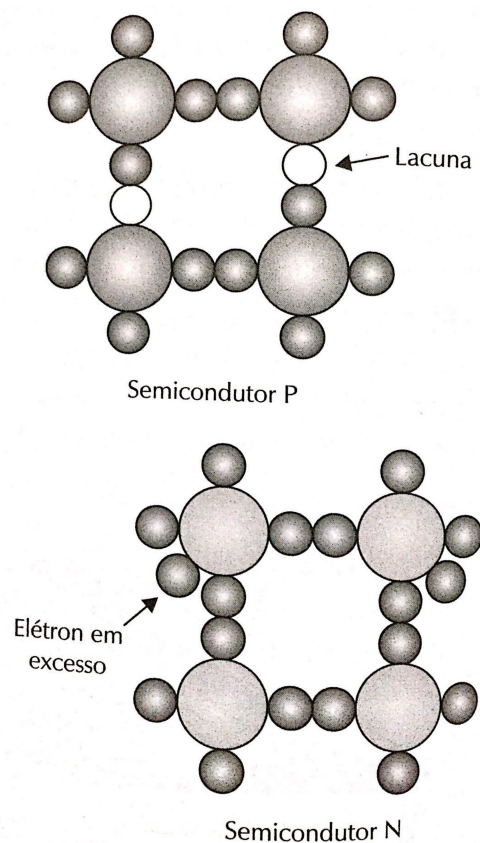
Figura 2 – Espectro da radiação solar

Fonte: (SOUZA et al., 2017)

O efeito fotovoltaico se dá em materiais semicondutores, que conduzem eletricidade de forma mais eficiente do que os materiais isolantes e menos do que os condutores. Eles se

caracterizam pela presença de uma faixa de valência e de outra totalmente vazia. Entre essas duas faixas se encontra a faixa proibida ou hiato energético. A largura dessa faixa determina se o material é semicondutor ou não. Para materiais semicondutores, essa faixa é de 1eV (BRAGA, 2008). A energia solar chega por meio de fótons, que é um quantum da radiação eletromagnética, se a energia contida nessa partícula for superior a esse hiato energético (gap), o material pode excitar elétrons da faixa de valência para a faixa de condução.

As camadas semicondutoras da célula podem ser fabricadas com vários materiais diferentes, sendo o mais comum o silício. Cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas fabricadas no mundo são de silício (VILLALVA, 2015). Uma célula fotovoltaica, consiste na junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N. Quando é dopado com Boro, carregado positivamente, o silício do tipo P apresenta uma falta de um elétron denominado tipo P e outra camada de material semicondutor carregado negativamente, chamado tipo N, com excesso de elétrons, dopada com fósforo. A Figura 3, demonstra a estrutura molecular desses semicondutores.



Scanned with CamScanner

Figura 3 – Estruturas moleculares dos semicondutores P e N

Fonte: (VILLALVA, 2015)

Cria-se uma junção “PN”, resultando em um campo elétrico constante nessa região. Quando ocorre a incidência de fótons, os elétrons são energizados e são transportado de uma

camada para outra, produzindo corrente elétrica, que é aproveitada nos contatos ligados nas extremidades. A Figura 4 ilustra o que ocorre quando as camadas PN são unidas e expostas a radiação solar(BRITO; SILVA, 2006).

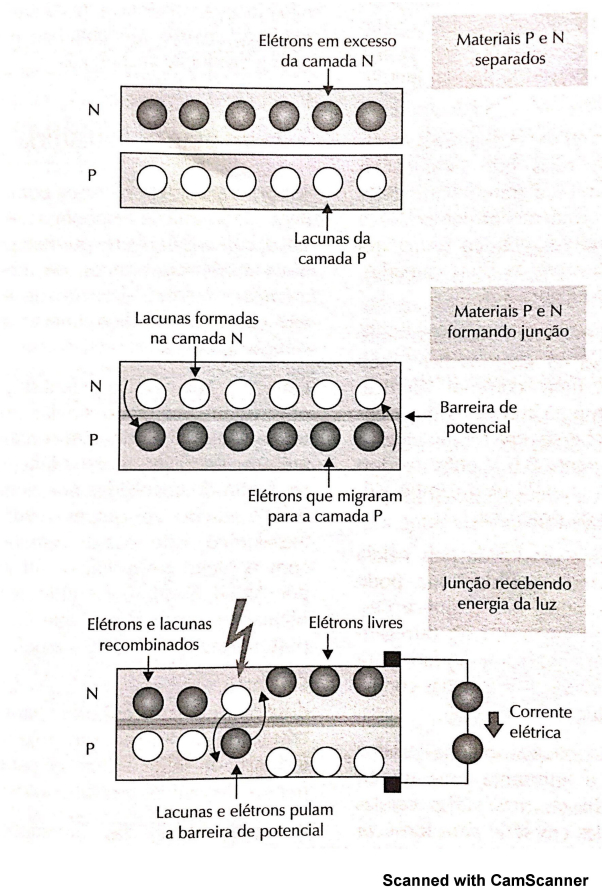


Figura 4 – Materiais semicondutores em três situações diferentes

Fonte: (VILLALVA, 2015)

A primeira aplicação do efeito fotovoltaico se deu em 1877, quando dois inventores norte-americanos, utilizaram o selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à radiação solar(BRITO; SILVA, 2006). A primeira célula solar fotovoltaica, surgiu em 1953, no Bell Labs que desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas, esse processo é conhecido como dopagem, que permitiu a criação das camadas P e N do silício.

## 2.3 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas aplicam o efeito observado por Becquerel em 1839, convertendo a radiação solar em energia elétrica, mas a primeira célula surgiu apenas em 1953, com um custo extremamente elevado, o que dificultou a difusão dessa tecnologia. Os usos possíveis para essa tecnologia se limitaram a aplicações especiais, como a produção de energia no espaço.

Os satélites inicialmente utilizavam pilhas químicas, a inserção de células solares era vista com desconfiança pela NASA, que incorporou no satélite Vanguard I como back-up, mas devido a falha da pilha, tornou-se o único sistema de abastecimento, mantendo o satélite operacional por oito anos. O bom resultado alcançando nessa experiência, fez com que os pesquisadores da agência americana adotassem as células solares como fonte de energia de seus satélites (BRITO; SILVA, 2006).

A crise petrolífera de 1973, fez com que os investimentos em programas de investigação para a redução dos preços de produção de células fotovoltaica disparassem. As décadas de oitenta e noventa, afirmaram o uso desse tipo de tecnologia. A primeira central solar de grande porte (1MWp) foi instalada na Califórnia em 1982, os governos de Alemanha e Japão, lançaram programas de incentivo ao uso residencial de painéis solares.

As células fotovoltaicas são os principais componentes na captação e transformação da radiação solar em energia elétrica. Segundo dados CRESEB 2014, as células de Silício constituem 87,9% do mercado mundial. Para a fabricação é utilizado o silício ultrapuro, com pureza de 99,9999%. As células podem ser classificadas de acordo com a estrutura molecular, podendo ser monocristalino, policristalino e silício amorfo.

### 2.3.1 Monocristalinas

As células de silício monocristalino são feitas a partir de um único cristal de silício, mergulhado em silício fundido, esse processo é conhecido como método de Czochralski (MACHADO; MIRANDA, 2014). Nesse processo, uma determinada quantidade de silício é fundida em um cadinho de quartzo. Uma “semente” (cristal de quartzo) de orientação conhecida, com temperatura controlada, é colocada em contato com o material fundido. O sistema é puxado lentamente formando um lingote de silício monocristalino (BELOTO, 1983). O processo está exemplificado na Figura 5.

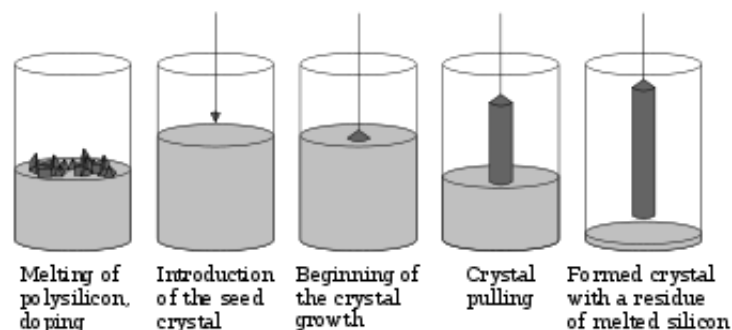


Figura 5 – Processo Czochralski

Fonte: (WIKIPEDIA, 2016)

O lingote de silício monocristalino, é constituído de uma estrutura cristalina única e possui uma estrutura molecular homogênea. O cilindro é cortado em fatias finas, com aproximadamente

300  $\mu\text{m}$ . Esse material fino, posteriormente é submetido a dopagem, onde recebem através de um processo químico impurezas que vão proporcionar a camada tipo P ou N (BRAGA, 2008). A eficiência do módulo representa o percentual máximo da energia total que atinge a superfície do módulo, na forma de radiação, que pode ser efetivamente convertida pelas células fotovoltaicas. O valor da eficiência é fornecido pelos fabricantes para uma condição padrão de teste, onde a potência nominal dos módulos atinge o respectivo valor, quando submetido a uma radiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ . A eficiência média das células fotovoltaicas produzidas industrialmente pelo método de Czochralski é de 16,5%, mas possuem um custo de produção mais elevado. A Figura 6 mostra uma célula já acabada, em um tom azulado escuro e uniforme.



Figura 6 – Célula de silício monocristalino

Fonte: (CEPEL, 2010)

### 2.3.2 Silício Policristalino

O silício policristalino, mostrado na Figura 6, é fabricado por um processo mais barato que o monocristalino, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes (VILLALVA, 2015). As células de silício policristalino, não passam pelo processo de Czochralski. Nesse caso o silício de alta pureza em estado fundente é resfriado, formando vários cristais (MACHADO; MIRANDA, 2014), como é possível ver na Figura 7. Segundo CRESESB 2014 as células de silício policristalino têm eficiência entre 14,5% e 16,2%.



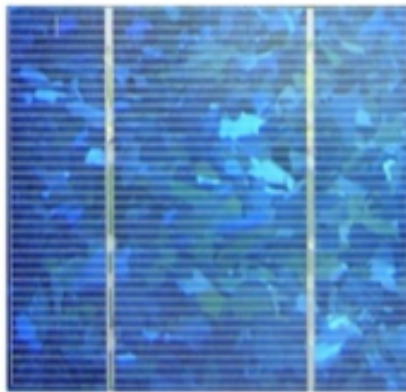


Figura 7 – Célula de silício policristalino

Fonte: (CEPEL, 2010)

### 2.3.3 Filmes Finos

Os módulos de filmes finos são construídos através da deposição de uma fina camada de material sobre um substrato de baixo custo, tais como vidro, aço inox ou plástico. As células de filme fino, não são limitadas ao tamanho do lingote como ocorre nas formações cristalinas, mas sim na dimensão do substrato. Quando o material fotossensível é depositado sobre uma superfície plástica, o módulo se torna flexível (BARBOSA et al., 2014).

A temperatura de fabricação dos filmes finos estão entre 200 °C e 500 °C, em oposição as temperaturas de até 1500 °C necessários para a fabricação de células cristalinas. Portanto, além de consumir menos matéria prima, os filmes finos consomem menos energia em sua fabricação, tornando-se uma tecnologia de custo baixo (VILLALVA, 2015)

O silício amorfo, é um tipo de módulo de filme fino. A grande desvantagem desses módulos é a baixa eficiência comparados as estruturas cristalinas. A célula amorfa, disponível na Figura 8, tem eficiência entre 5% e 10%, além disso, sua eficiência reduz durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devido a degradação induzida, até chegar a um valor estável (VILLALVA, 2015). O tempo de vida dessas células é mais curto, chegando a 10 anos, comparado aos 25 anos que podem chegar as cristalinas. Apesar das desvantagens citadas, as células possuem um custo de fabricação mais baixo e podem ser fabricadas em grandes áreas.



Figura 8 – Célula de silício amorfo

Fonte: (CEPEL, 2010)

### 2.3.4 Comparação entre a tecnologias

Os diferentes materiais e processos produtivos, levam à obtenção de módulos fotovoltaicos com eficiências variadas. As células com maior eficiência, tem um custo mais elevado, por serem produzidas com materiais mais nobres e conseqüentemente necessitam de uma área menor para a produção de energia se comparado a módulos de menor valor, como os de filme fino(VILLALVA, 2015). A Tabela 1, contém as informações de produtividade de alguns tipos de painéis.

Tabela 1 – Comparação de diversas células fotovoltaicas com eficiência medida em laboratório com irradiância de  $1000W/m^2$  e  $25^{\circ}C$

MATERIAL DA CÉLULA	EFICIÊNCIA EM LABORATÓRIO (%)
Silício Monocristalino	$26.7 \pm 0.5$
Silício Policristalino	$22.3 \pm 0.4$
Silício Amorfo	$10.2 \pm 0.3$
CdTe (Telureto de Cádmio)	$21.0 \pm 0.4$
CIGS(Cobre-Índio-Galio-Selênio)	$22.9 \pm 0.5$
Célula Orgânica	$11.2 \pm 0.3$

## 2.4 Funcionamento dos módulos fotovoltaicos

Os painéis ou módulos fotovoltaicos, são formados pelo agrupamento de células conectadas. Uma célula consegue fornecer uma tensão de aproximadamente 0,6V. Para produzir módulos capazes de produzir tensões maiores, os fabricantes as agrupam em série. A Figura 9, mostra esse tipo de agrupamento, que vai depender da tensão elétrica desejada. Em que a tensão total é obtida através da soma das tensões de cada célula.

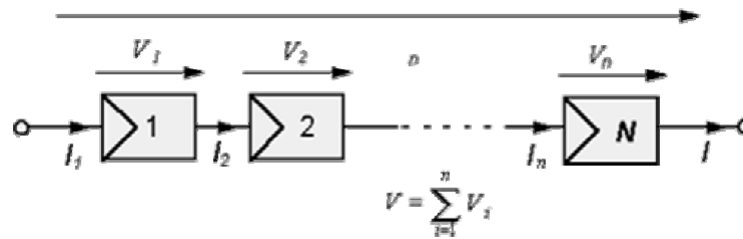


Figura 9 – Associação em série de células fotovoltaicas

Fonte: (BRAGA, 2008)

### 2.4.1 Características dos módulos

A potência dos módulos é expressa em Watt-pico (Wp). Essa informação é obtida através de testes laboratoriais, com nível de irradiância controlado em  $1000\text{W}/\text{m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Entretanto, existem outras características elétricas importantes que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo. Sendo as principais (PINHO; GALDINO, 2014):

- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): A tensão de circuito aberta, simbolizada como  $V_{oc}$ , que vem do inglês OC = Open Circuit, que significa circuito aberto. Esse é o valor de tensão em volts que o módulo fornece nos seus terminais quando desconectados.
- Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ): A corrente de curto circuito é simbolizada como  $I_{sc}$ , sendo SC = Short Circuit (curto circuito). É a corrente elétrica medida quando os terminais do módulos estão conectados entre si. Esse valor é importante para o dimensionamento do sistema, pois é a corrente máxima que o módulo vai fornecer sobre qualquer hipótese.
- Potência de pico ( $P_{mp}$ ): A potência de pico é o valor máximo que o módulo é capaz de produzir. Corresponde ao ponto no qual a curva  $I \times V$  é máximo.
- Eficiência do módulo ( $\eta_p$ ): No Brasil os módulos são certificados e avaliados pelo INMETRO. A eficiência é dada pela equação 2.3:

$$\eta_p = \frac{P_{max}}{(A_p \times 1000)} \quad (2.3)$$

Onde,

$P_{max}$  é a potência máxima ou pico do módulo [W] e  $A_p$  é a área do módulo [ $\text{m}^2$ ]. Na fórmula apresentada o número 1000 corresponde à taxa de radiação solar padronizada de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  (VILLALVA, 2015).

## 2.4.2 Curva característica I x V

O valor de tensão e corrente do módulo variam de acordo com a condição de operação. Essas medidas podem ser plotadas em gráfico, para isto, basta variar as condições de carga. Os valores plotados no gráfico e unidos por uma linha dá origem a ao que é chamado de Curva Característica I x V (PINHO; GALDINO, 2014), disponível na Figura 10:

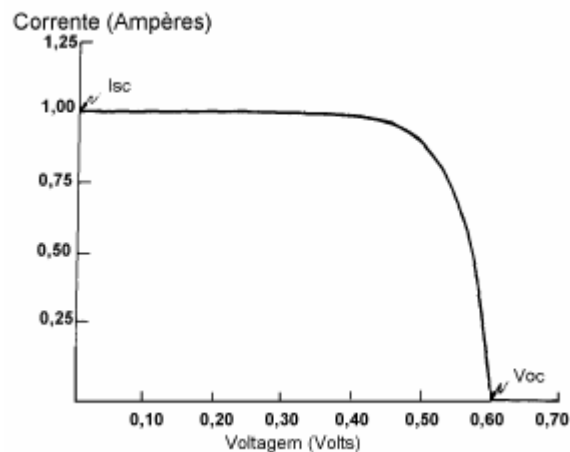


Figura 10 – Curva característica I x V de uma célula de silício

Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

Para cada ponto da curva IxV, existe um ponto de máxima potência gerada para aquela condição de operação. A Figura 11, mostra o ponto de máxima potência que pode ser alcançado por uma célula. Além disso, vale destacar que para as condições de circuito aberto e curto circuito, não há geração de potência, pois, nesses casos a corrente ou tensão são zero, respectivamente.

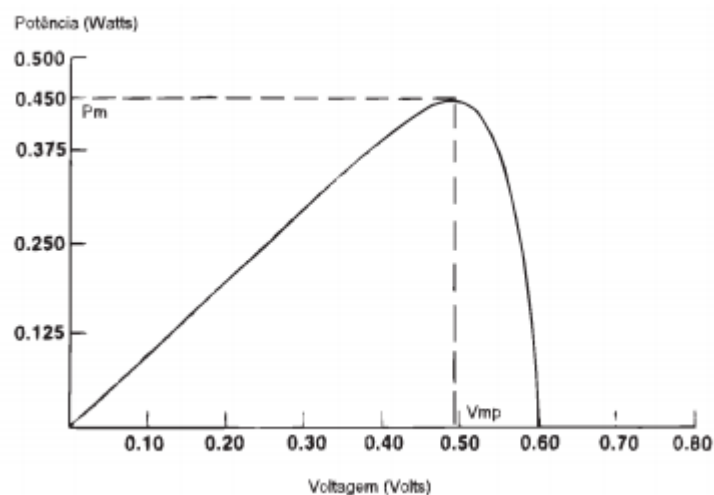


Figura 11 – Curva típica de potência versus tensão

Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

A Figura 12, mostra a curva característica I x V superposta à curva de potência para análise dos parâmetros.

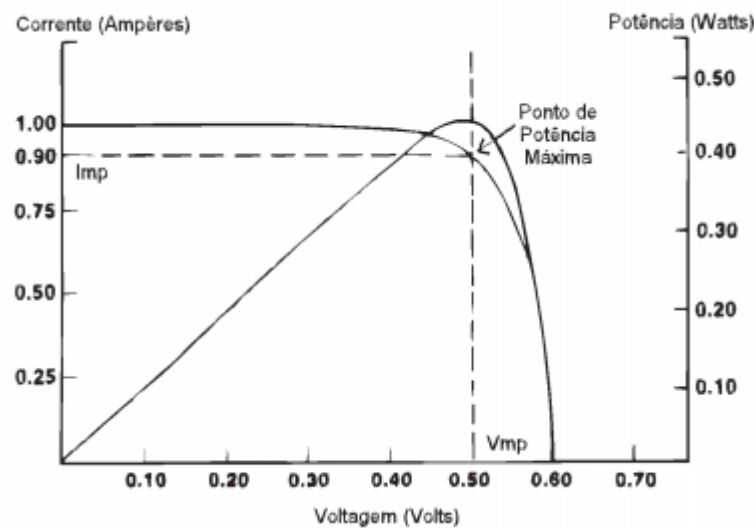


Figura 12 – Parâmetros de máxima potência

Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

## 2.5 Fatores que afetam o funcionamento dos módulos

O desempenho dos painéis é influenciado pela temperatura e irradiância que incide sobre as células fotovoltaicas. As condições padrões de teste, em que são plotadas as curvas características dos módulos, são definidas como uma irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  (radiação recebida na superfície da terra em um dia sem nuvens ao meio dia) e a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Além desses fatores, o sombreamento sobre apenas uma célula pode fazer com que o módulo fotovoltaico deixe de produzir energia.

### 2.5.1 Irradiância

A potência gerada pelos módulos depende diretamente ao fluxo de fótons que incide sobre a superfície das células. O movimento do sol faz com que a radiação recebida pelas placas seja diferente ao decorrer das horas do dia e à mudança de estações, pois o sol vai estar mais próximo ou mais distante da superfície da Terra. O movimento pode ser acompanhado pelos painéis através de seguidores (ou *trackers*), mas por possuírem um custo elevado, não é utilizado em instalações residenciais. Nesses casos, é fundamental que seja ajustada a inclinação de acordo com a latitude local e escolher uma face do telhado que esteja posicionada mais próximo ao ponto cardeal norte. A Figura 13, mostra a influência da irradiância na operação dos módulos.

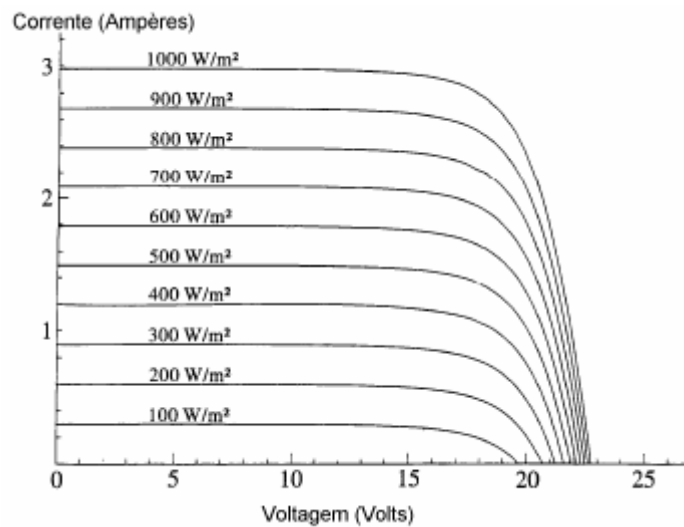


Figura 13 – Influência da radiação solar na operação do módulo

Fonte: (BRAGA, 2008)

## 2.5.2 Temperatura

A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece em seus terminais e conseqüentemente a sua potência produzida (VILLALVA, 2015). A corrente fornecida pelo módulo quase não se altera com a variação de temperatura, em contrapartida, a tensão sofre uma queda significativa com o aumento de temperatura, ocasionando uma redução na potência fornecida pelo módulo, tendo em vista que a potência é o produto entre tensão e corrente. A Figura 14, mostra as curvas para diferentes valores de temperatura.

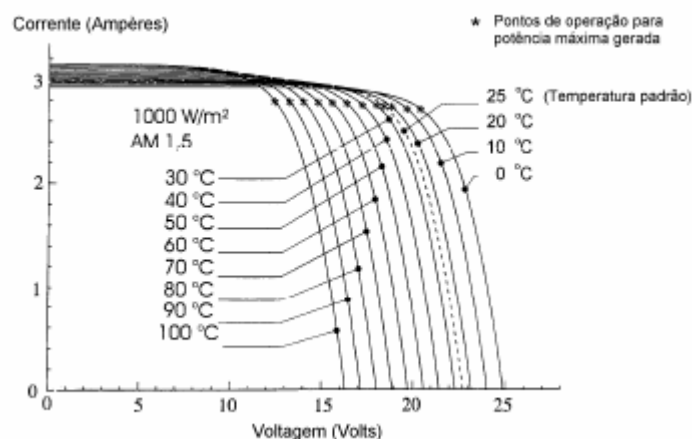


Figura 14 – Influência da temperatura na operação de um módulo fotovoltaico

Fonte: (BRAGA, 2008)

### 2.5.3 Sombreamento

A intensidade da corrente elétrica produzida por uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional à intensidade de radiação que incide sobre ela (VILLALVA, 2015). As células do módulo fotovoltaico, por estarem conectadas em série, dependem umas das outras para produzir corrente. O efeito do sombreamento ocorre quando uma ou mais células recebem pouca ou nenhuma luz, impedindo a passagem da corrente das outras células. A Figura 15, é uma situação comum, em que uma célula é obstruída por uma folha, interrompendo a produção de toda aquele conjunto.

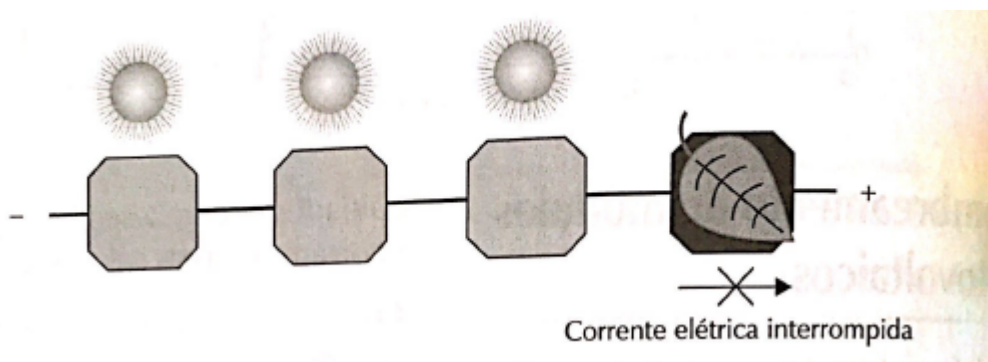


Figura 15 – Módulo fotovoltaico sobre o efeito de uma sombra

Fonte: (VILLALVA, 2015)

O diodo de *by-pass* é uma das formas de minimizar o efeito do sombreamento nos módulos fotovoltaicos. Esse dispositivo, é ligado em paralelo com as células. A condição ideal seria ligar um diodo por célula, mas financeiramente não é viável, com isso, os fabricantes usam para um grupo de células, como mostra a Figura 16 .

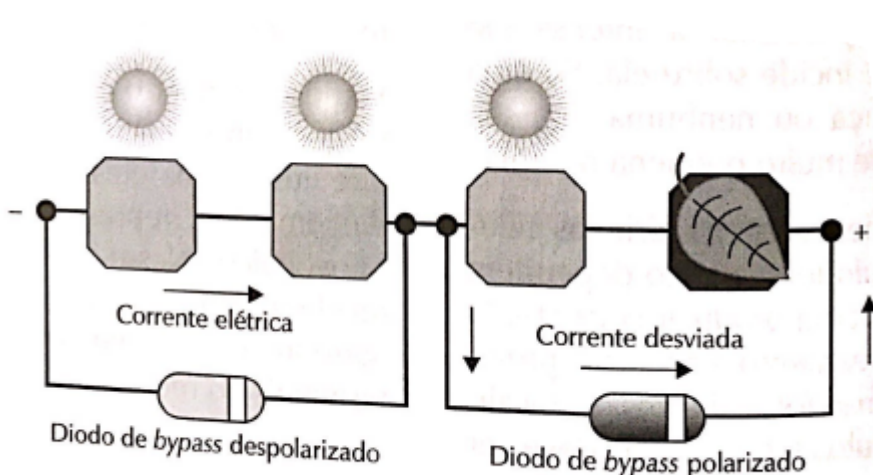


Figura 16 – Módulo Fotovoltaico com sombra em uma célula com diodo *by-pass*

Fonte: (VILLALVA, 2015)

O uso do diodo de *by-pass* permite a passagem de corrente em paralelo a célula sombreada ou defeituosa. A Figura 17, mostra a curva característica de uma célula em três situações distintas:

Funcionamento normal (sem sombreamento), funcionamento com sombreamento e com diodo de by-pass e o pior caso, em que a célula está sombreada e sem o diodo.

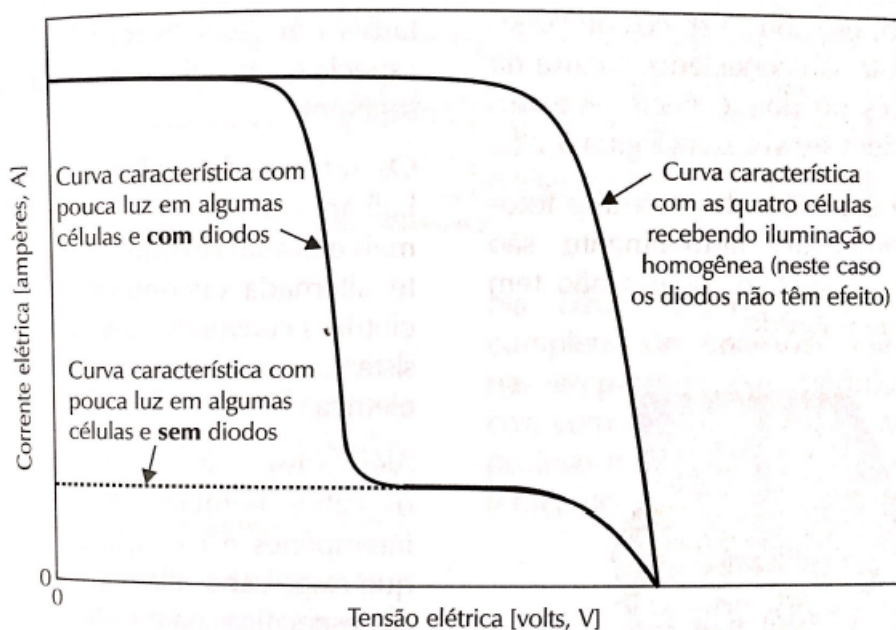


Figura 17 – Curva característica do módulo com sombreamento

Fonte: (VILLALVA, 2015)

A partir de certo valor de tensão os diodos de by-pass são despolarizados e a corrente do módulo é limitada ao valor que as correntes do módulo podem fornecer. Os diodos podem não ser a solução excelente, mas permitem que os painéis permaneçam operando com um desempenho razoável.

## 2.6 Baterias

As baterias são uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia. Quando uma bateria está conectada a um circuito elétrico, há fluxo de corrente devido a uma transformação eletroquímica em seu interior, ou seja, há uma conversão de energia química em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014). Segundo Dazcal e Mello 2008, são dispositivos responsáveis por fazer o armazenamento da energia gerada pelos módulos, com intuito de suprir a demanda da mesma na ausência da energia solar. Com isso, são consideradas de extrema importância, já que a radiação solar não ocorre durante a noite e tem valores bem reduzidos em dias nublados.

Nos sistemas fotovoltaicos, é recomendado o uso de baterias estacionárias, pois possuem placas metálicas mais grossas, suportando ciclos profundos, em que a bateria pode descarregar quase por completo sem se danificar. Segundo Villalva 2015, a bateria estacionária possui uma taxa de auto descarga menor do que uma bateria convencional automotiva, ou seja, mesmo passando um longo tempo sem ser recarregada, podendo ser um período extenso de chuvas constantes, a carga elétrica é preservada.



## 2.7 Controlador de Carga

Os sistemas fotovoltaicos com baterias devem, obrigatoriamente, empregar um controlador de carga. O controlador de carga é o dispositivo que faz a correta conexão entre o painel fotovoltaico e a bateria, evitando que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada excessivamente (VILLALVA, 2015). Esse acessório monitora a carga da bateria e impede que ela descarregue completamente, aumentando sua vida útil. Já em períodos de grande insolação e pequeno consumo energia, a bateria tende a carregar em excesso, aumentando sua tensão e diminuindo sua vida útil. O controlador interfere e desconecta as os módulos que alimentam a bateria.

Os componentes do sistema devem ser conectados ao controlador de carga. O módulo nunca deve ser ligado diretamente à bateria. A Figura 18, mostra o esquema de ligação de um sistema contendo bateria.

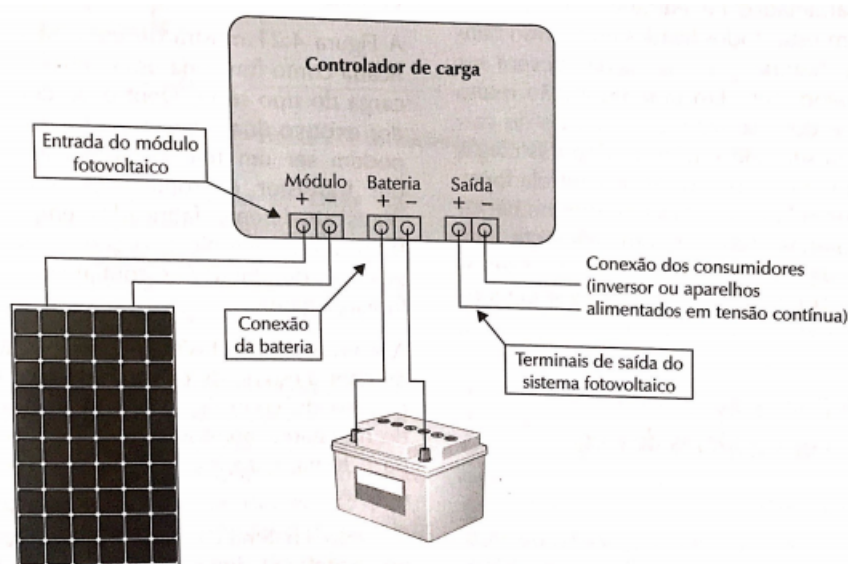


Figura 18 – Modo de utilização do controlador de carga

Fonte: (VILLALVA, 2015)

A conexão dos consumidores deve ser feita ao controlador, pois assim, o controlador mantém um controle sobre a profundidade de descarga da bateria, interrompendo o fornecimento caso o nível fique muito baixo e possa danificá-la permanentemente. Esses aparelhos são especificados de acordo com sua corrente máxima, são encontrados na faixa de 10A a 60A, modelos com maior capacidade são incomuns (VILLALVA, 2015).

### 2.7.1 Principais tipos de controlador de carga

O mercado oferece muitos tipos de controladores de carga, com grandes variações de função e preço, sendo as opções mais comuns os modelos PWM e MPPT. A escolha desses aparelhos vai de acordo com o projetista, mas seguindo algumas características:

- Chaveamento eletrônico;
- Proteção contra inversão de polaridade;
- Desconexão da carga para proteger a bateria de usos excessivos;

### 2.7.2 Controlador Eletrônico com PWM

Os controladores usam a tecnologia PWM, existem transistores e um circuito de controle que fazem o gerenciamento preciso da corrente que é enviada para a bateria, respeitando o perfil de carga em três estágios: carga pesada, absorção e flutuação. A Figura 19, mostra o esquema simplificado de controlador PWM.

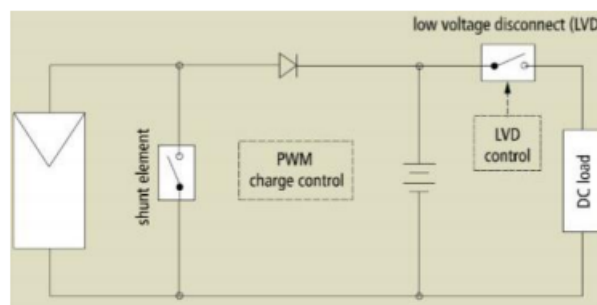


Figura 19 – Controlador PWM

Fonte: (MOREIRA, 2016)

### 2.7.3 Controlador MPPT

O controlador MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) garante que o valor máximo de potência é extraído dos módulos fotovoltaicos (SINGH, 2013). O sistema realiza uma varredura na curva  $I \times V$  do sistema de geração e determina a tensão de operação ótima, em que o sistema vai operar em máxima potência. Segundo Villalva 2015, os controladores MPPT sejam mais caros, acabam sendo vantajosos, pois permitem um ganho de 30% na produção de energia. Os outros controladores operam com valores de tensão próximos aos da bateria, ou seja, entre 10V e 15V, na Figura 20 é possível ver a ganho ao se utilizar um controlador MPPT.

## 2.8 Inversor

A maior parte dos eletrodomésticos conhecidos é construída para trabalhar com a rede elétrica de tensão alternadas disponíveis nas residências, tensão de 127V ou 220V, por exemplo, e frequência de 60 Hertz (VILLALVA, 2015). Os módulos fotovoltaicos geram tensão contínua (tensão CC) e para realizar a conversão em tensão alternada (tensão CA) são utilizados inversores, que além de transformar o sinal saída em uma onda senoidal ou quadrada, elevam a tensão para os valores residenciais.

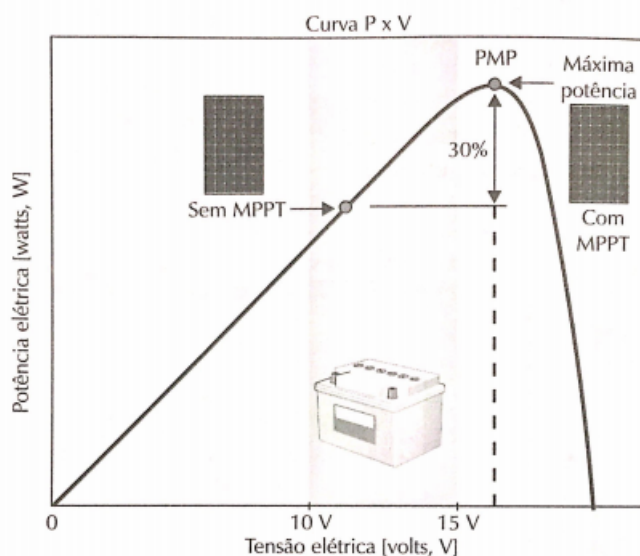


Figura 20 – Operação do módulo com o controlador MPPT

Fonte: (VILLALVA, 2015)

Atualmente, existem três tipos de inversores utilizados em sistemas autônomos: inversor de onda quadrada, de onda senoidal modificada e de onda senoidal pura. Segundo Villalva 2015, “as ondas semi-quadradas possuem menos distorção harmônica do que as ondas totalmente quadradas, porém, ambas são muito distorcidas quando comparadas com uma senoidal pura”. Assim, esses tipos de inversores são indicados para aparelhos que não sejam sensíveis aos ruídos, como eletrodomésticos e lâmpadas. Já em processos que dependem da qualidade do sinal, são utilizados os inversores de onda senoidal pura, sendo que esses possuem um valor agregado maior, por serem mais complexos.

## 2.9 Sistemas Autônomos

Os sistemas fotovoltaicos autônomos, ou sistemas isolados, são utilizados em lugares onde não há redes elétricas convencionais. No Brasil, há muito desses locais não atendidos por malhas do sistema elétrico nos quais, geralmente, utilizam-se geradores movidos a diesel. Além dessa aplicação, os sistemas autônomos podem ser implementados na iluminação pública, na sinalização de estradas, alimentação de sistemas de telecomunicações, no carregamento de baterias de veículos elétricos, e em outras aplicações que envolvem desde pequenos aparelhos eletrônicos portáteis até sistemas espaciais. (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

A energia elétrica de grande parte da população brasileira, cerca de 98% é fornecida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que é o conjunto de instalações que permitem a concessionária de energia levar eletricidade as residências. Atualmente o SIN está presente em quase todos os estados brasileiros, com exceção de Roraima. O suprimento desse estado é realizado por Sistemas Isolados e por uma linha de transmissão proveniente da Venezuela (IEMA, 2019a).

Os Sistemas Isolados, são definidos pelo Decreto nº 7.246/2010, como serviços desconectados do SIN. A maior parte desses sistemas se encontra na Amazônia, cerca de 3 milhões de pessoas são atendidas dessa forma e 97% dessas pessoas utiliza o sistema de geradores a diesel. Apesar de ser obrigação das operadoras fornecer eletricidade para comunidades isoladas, o governo criou o programa Luz para Todos (LpT), que atualmente custeia a instalação dos sistemas de geração, mas todo o custeio de operação e manutenção é realizado pelas concessionárias.

O custo da energia gerada pelos sistemas isolados (R\$/kWh) é maior do que a média apresentada pelos sistemas interligados ao SIN. Para balancear o custo, foi criada a Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) pela Lei nº 8.631/1993 (atualizada Lei nº 13.360/2016). Por meio dessa Lei, os consumidores dos Sistemas Isolados, conseguem pagar menos, pois os recursos do CCC são utilizados para abater parte dos custos das operadoras.

Os recursos do CCC, são provenientes da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), que é um encargo pago por todos os consumidores de energia elétrica. Os recursos do CDE também são utilizados para financiar o programa LpT e outros subsídios, como a Tarifa Social. (IEMA, 2019a). O orçamento é estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). O orçamento para 2019 é de R\$20,2 bilhões, a divisão para cada programa pode ser vista na Figura 21.

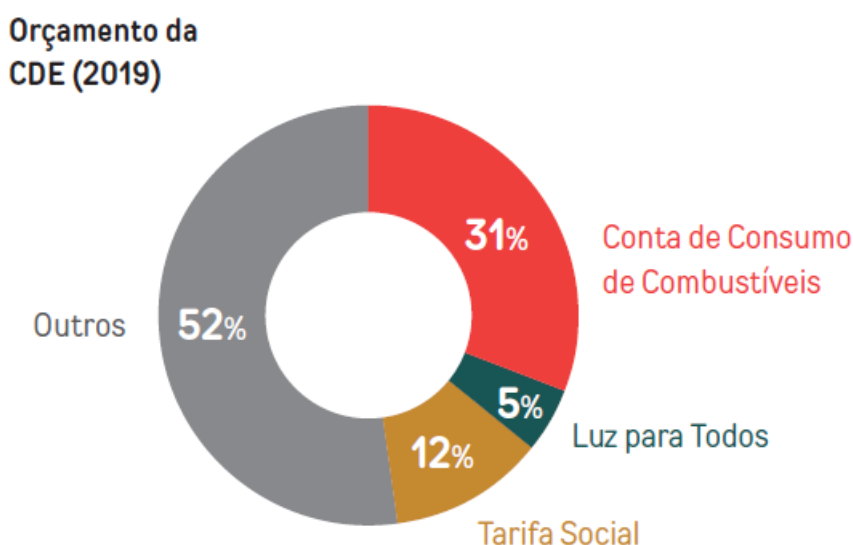


Figura 21 – Orçamento CDE 2019

Fonte: (IEMA, 2019a)

### 2.9.1 Projeto Xingu Solar

O projeto Xingu Solar, foi um projeto realizado através de uma iniciativa particular, sem fins lucrativos. O Instituto Socioambiental (ISA), instalou 70 sistemas fotovoltaicos em 65 comunidades, fornecendo cursos de capacitação para habilitar a população das comunidades do

Território Indígena do Xingu (TIX) que receberam os sistemas, a realizarem a manutenção e operação dos módulos.

A utilização de um sistema fotovoltaico em comunidades como as do TIX é uma alternativa eficiente ao uso dos geradores a diesel ou gasolina. Os geradores além de gerarem uma quantidade muito elevada de CO<sub>2</sub>, produzem muito ruído durante a operação e a logística para se obter o combustível, que pode causar falta de abastecimento e limita o tempo de funcionamento.

O Xingu Solar, é um projeto piloto que visa atender parcialmente o fornecimento de energia dessas comunidades, tendo como objetivo final, gerar dados para demonstrar que é possível atender essa população que está isolada com o investimento adequado nessa fonte renovável. O estudo também constatou a importância do treinamento para o sucesso da utilização da nova tecnologia. Segundo o relatório do IEMA 2019b “o oferecimento de cursos sobre sistemas solares no âmbito do projeto desenvolvido pelo ISA fez com que representantes das aldeias tenham familiaridade com o projeto desses tipos de sistemas, mesmo que de forma ainda inicial.”.

## 3 Desenvolvimento

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira foi feita a seleção dos componentes da bancada e do sistema de microgeração do laboratório. No segundo, foi realizada a montagem do sistema de geração e da bancada didática, tendo em vista produzir um material completo, mas de fácil utilização, para não impor limites aos usuários desse projeto.

### 3.1 Seleção dos componentes do sistema

Os componentes do sistema, foram escolhidos a fim de permitir o usuário total interação com o sistema e visualizar as tecnologias presentes em um projeto de instalação *off-grid*. A Figura 22, apresenta as escolhas discriminadas por local onde foram utilizadas.

Componente	Quantidade	Local de utilização	Limite de corrente
Porta Fusíveis	4	StringBox	20A
Chave Seccionadora - DC	1		32A
Volt Amperímetro	4	Bancada Didática	10A
Barra de cobre eletrolítico	5		n/a
Controlador de Carga MPPT Epsolar	1		40A
Tracer			
Bateria Estacionária 12V	1		165Ah
Botão On/Off 12V	4		5A
Painel Fotovoltaico - 270 W	4	Microgeração	n/a
Conector MC4	8 pares		30A

Figura 22 – Lista de componentes do projeto

A **StringBox**, é uma caixa de junção, que liga os módulos fotovoltaicos ao controlador de carga, além disso trazem em sua composição, elementos de proteção:

- Fusíveis que vão proteger os cabos de excesso de corrente;
- Dispositivos de proteção contra surtos - DPS;
- Interruptor CC, que permita o desligamento do sistema para possível manutenção;

A Figura 23, apresenta a stringbox montada no laboratório de automação predial. A montagem não apresenta o DPS, que foi colocado em outra estrutura.

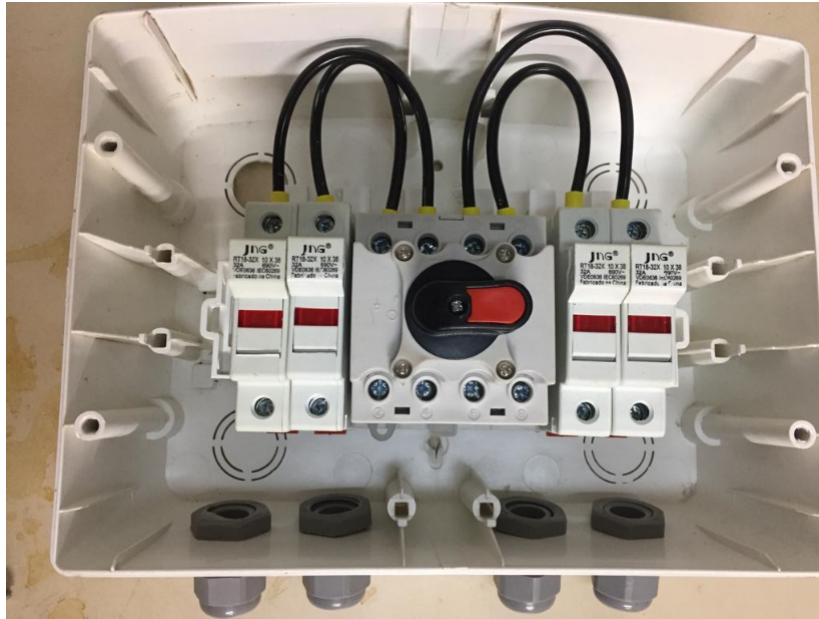


Figura 23 – Caixa de proteção(StringBox)

O inversor escolhido para o projeto possui capacidade nominal de 1000W e uma saída de tensão de 220V. O sinal de saída do equipamento emite uma quantidade elevada de harmônicos para a rede por se tratar de uma onda quadrada, que é obtida alternando-se a tensão e corrente. Esse tipo de inversor não é indicado para cargas indutivas, como por exemplo motores, pois pode provocar sobreaquecimento, mas é bem recomendado para a utilização com cargas resistivas, como no caso de lâmpadas. Como no laboratório esse equipamento só vai alimentar cargas resistivas, foi escolhido por apresentar um menor valor de aquisição. A Figura 24, mostra o inversor posicionado preso à lateral da bancada.



Figura 24 – Inversor de Frequência DAK 1000W

O controlador de carga escolhido foi o Epsolar MPPT Tracer 40A, que suporta uma potência de 540W alimentado a 12V. O equipamento foi dimensionado de acordo com a potência produzida por dois painéis de 270Wp. Esse equipamento possui uma eficiência de conversão de 98%, podendo chegar à máxima de 99,5%. O painel possui um espaço para ser alocado outro

controlador de carga, preferencialmente um PWM, visando comparar o efeito de conversão. A Figura 25, demonstra esse equipamento em funcionamento.



Figura 25 – Controlador de carga MPPT Epsolar

Afim de simular um projeto de um sistema off-grid de pequeno porte, foi escolhida uma bateria estacionária Freedom com capacidade de 165Ah. De acordo com Ghafoor e Munir<sup>2015</sup>, a equação para determinar o tamanho do sistema de baterias é dado por:

$$C_b = \frac{N_{dn} \times L_c}{\eta_B \times D_b \times \eta_I} \quad (3.1)$$

Onde,

$C_b$  = Capacidade da bateria [Ah];

$N_{dn}$  = Quantidade de dias nublados;

$L_c$  = Necessidade das cargas conectadas ao sistema;

$\eta_B$  = Eficiência da bateria;

$D_b$  = Dias nublados;

$\eta_I$  = Eficiência do inversor;



A placas foram dispostas sobre uma estrutura simulando um estacionamento. Os módulos escolhidos foram os da marca Canadian Solar, com capacidade de geração de  $270 W_p$ . A microssina capacidade de produção de  $1080 W_p$ . Na Figura 226, é possível visualizar as placas sendo utilizadas como estrutura de cobertura do estacionamento.



Figura 26 – Telhado Fotovoltaico

## 4 Resultados

A Figura 27, mostra a configuração final da bancada didática. Os amperímetros/voltímetros, fazem a leitura instantânea das grandezas. A esses equipamentos foram ligados diferentes tipos de carga: Fitas de LED, lâmpada de LED 12V e lâmpadas de LED 220V.

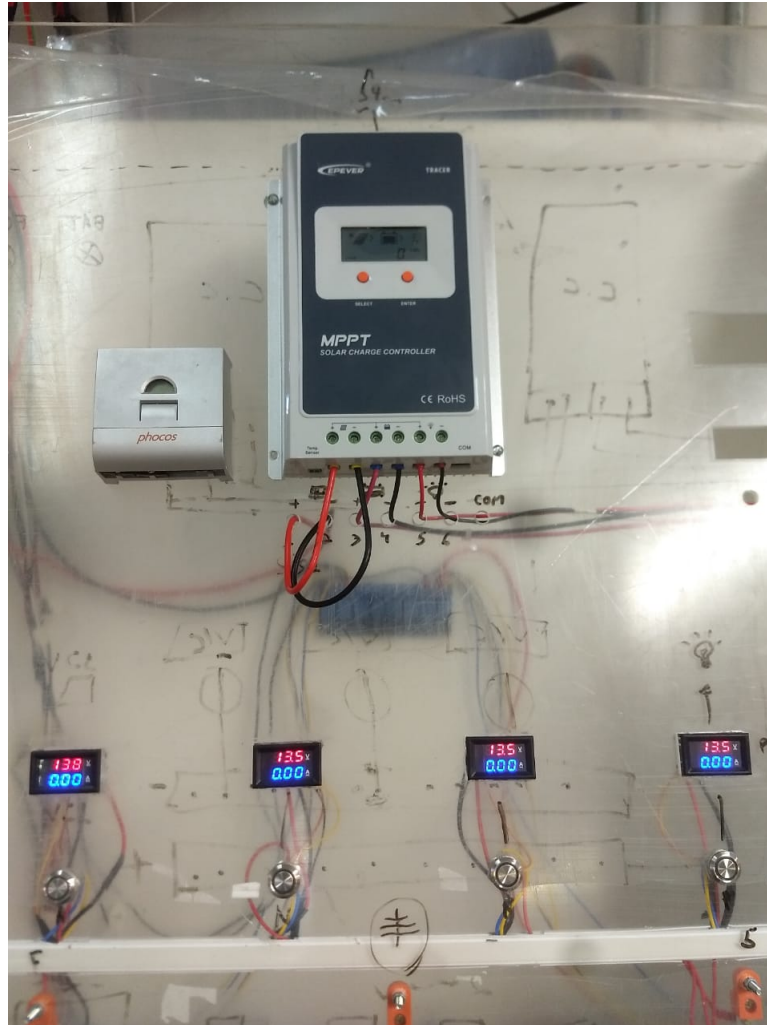


Figura 27 – Bancada Didática

A utilização direta de cargas de 12V é o mais recomendado para que não tenha desperdício de carga no inversor de frequência. As lâmpadas de LED 127V – 220V, são as mais tradicionais e facilmente encontradas no mercado, uma lâmpada 10W e27 é encontrada por cerca de R\$10,00, já uma lâmpada 12V tem um custo bem superior, cerca de R\$29,00 por uma lâmpada com a mesma potência.

As fitas de LED, são uma boa alternativa quando não é necessária uma intensidade luminosa muito grande. As fitas colocadas no laboratório de automação predial são alimentadas pelo sistema fotovoltaico e podem ser utilizadas em aulas que o conteúdo é apresentado via slides.

A Figura 28, mostra o laboratório iluminado apenas pelas fitas, fornecendo uma boa intensidade luminosa, que não atrapalha o projetor.

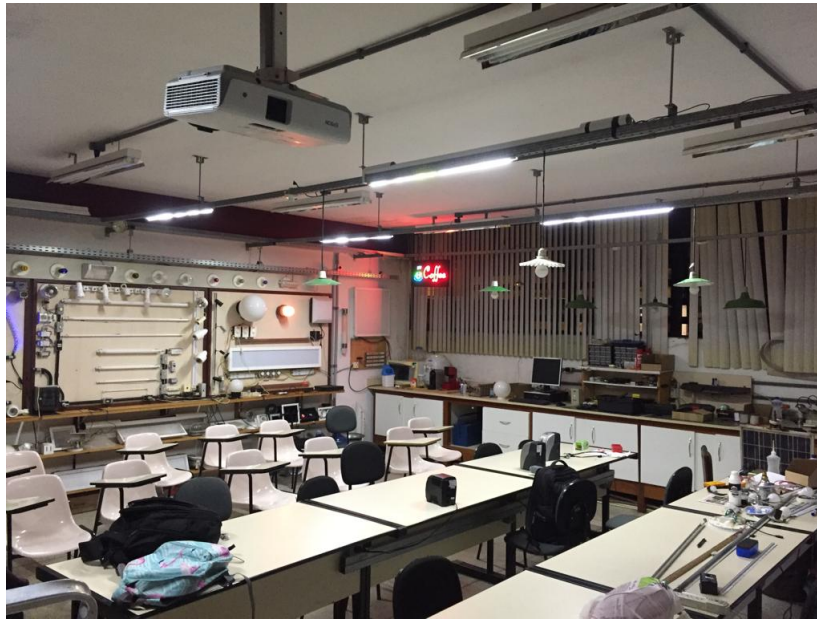


Figura 28 – Fitas de LED alimentadas pelo telhado fotovoltaico

A iluminação 127V, além de ter um consumo mais elevado devido ao inversor de frequência, foi selecionada para demonstrar o conceito de temperatura de cor. A unidade utilizada é o Kelvin [K], sendo conceito de temperatura de cor está diretamente ligado a composição espectral da luz emitida pelas lâmpadas. Essa temperatura pode ser dividida da forma:

- **Branco Quente:** tipicamente de 2600 Kelvin a 3500 Kelvin
- **Branco Neutro:** tipicamente de 4000 Kelvin a 4500 Kelvin
- **Branco (aproxima-se da luz do Sol):** tipicamente de 5000 Kelvin a 5500 Kelvin
- **Branco Frio:** tipicamente acima de 6000 Kelvin

As lâmpadas do laboratório apresentam temperaturas de 2700K, 6000K e 6500K. A Figura 29, apresenta o efeito produzido por essas lâmpadas.

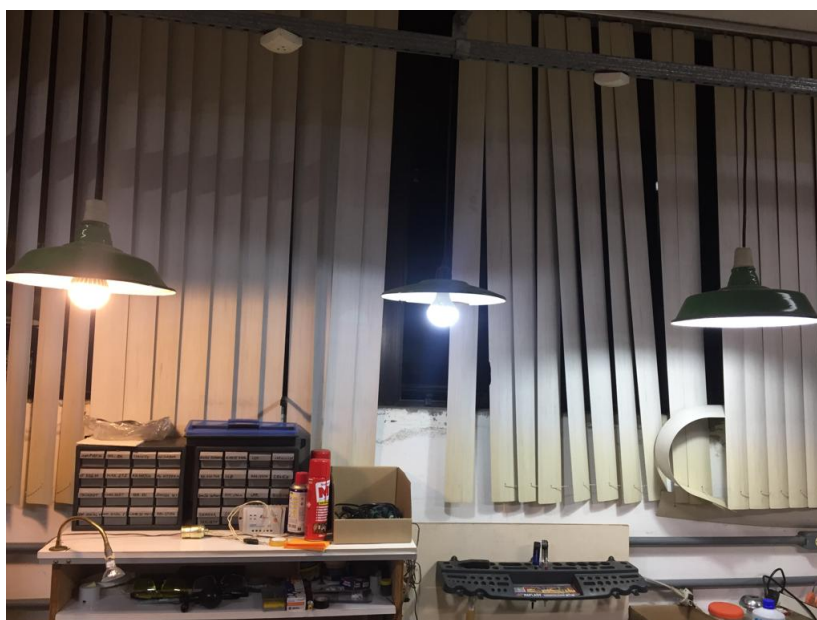


Figura 29 – Lâmpadas 127V com diferentes temperaturas de cor

# 5 Considerações Finais

## 5.1 Conclusão

A necessidade de se ter um treinamento da população evidenciada pelo projeto implementado no Território Xingu, motivou a produção dessa bancada didática. A implementação de sistemas autônomos pode ser a solução para comunidades isoladas. Os sistemas fotovoltaicos autônomos possuem benefícios para o meio ambiente, por não gerarem as toneladas de  $CO_2$  emitidos por geradores a Diesel, além de evitar os ruídos. O sistema permite uma facilidade de operação e manutenção desde que se tenha um treinamento apropriado.

## 5.2 Trabalhos Futuros

A bancada é um primeiro passo para o estudo da geração de energia fotovoltaica. A estrutura foi pensada para permitir a utilização em trabalhos futuros. Os sistemas de iluminação estão ligados por relés, permitindo posteriormente a criação de um sistema de acionamento via aplicativo. O monitoramento em tempo real é outro sistema que pode ser implementado e disponibilizado via Web, permitindo maior acesso as informações do projeto.

# Referências

- ANEEL. *Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída*. 2019. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877)>. 1
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520: Informação e documentação - apresentação de citações em documentos*. Rio de Janeiro, 2002. 7 p.
- BARBOSA, E. M. de S. et al. *Panorama do desenvolvimento tecnológico e mercado de módulos fotovoltaicos*. 2014. 10
- BELOTO, A. F. *Estudo das características de células solares de silício monocristalino*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1983. 8
- BRAGA, R. P. *Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 6, 9, 12, 15
- BRITO, M. C.; SILVA, J. A. *Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade*. Lisboa, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2006. 7, 8
- CASTELLS, M. et al. *A sociedade em rede*. [S.l.]: Paz e Terra São Paulo, 2007. v. 1. 2
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *As energias solar e eólica no Brasil*. 2010. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/afermartins/casasolar2011>>. Acesso em: 06 de junho de 2019. 9, 10, 11
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. *Atlas solarimétrico de minas gerais*. Belo Horizonte, p. 80, 2012. 1
- DAZCAL, R.; MELLO, A. *Estudo da implementação de um sistema de energia solar fotovoltaica em um edifício da universidade presbiteriana mackenzie*. *Abenge—Associação Brasileira de Educação de Engenharia*. Fortaleza, 2008. 17
- FU, R. et al. *US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017*. [S.l.], 2017. 1
- GAZOLI, J.; VILLALVA, M. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. São Paulo: Érica, 2012. 20
- GHAFOOR, A.; MUNIR, A. *Design and economics analysis of an off-grid pv system for household electrification*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 42, p. 496–502, 2015. 4, 25
- IEMA, INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Como a energia renovável pode beneficiar o Território Indígena do Xingu*. 2019. Disponível em: <[www.energiaeambiente.org.br](http://www.energiaeambiente.org.br)>. 1, 20, 21
- INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Aprendizados e desafios da inserção de tecnologia solar fotovoltaica no Território Indígena do Xingu*. 2019. Disponível em: <[www.energiaeambiente.org.br](http://www.energiaeambiente.org.br)>. 1, 22

- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista virtual de química*, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2014. 8, 9
- MOREIRA, F. M. B. *Sistema fotovoltaicos*. Tese (Doutorado) — ESTT - Escola Superior de Tecnologia de Tomar, 2016. 19
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014. 8, 9, 12, 13, 14, 17
- SINGH, G. K. Solar power generation by pv (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, Elsevier, v. 53, p. 1–13, 2013. 19
- SOUZA, R. B. de et al. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 13, n. 1, 2017. 5
- VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. *Gazeta de Física*, v. 1, n. 2, 2006. 4
- VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2015. 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20
- WIKIPEDIA. *Processo de Czochralski*. 2016. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Processo\\_de\\_Czochralski](https://pt.wikipedia.org/wiki/Processo_de_Czochralski)>. Acesso em: 06 de junho de 2019. 8