



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA**

**CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**CEFET/RJ – UnED PETRÓPOLIS**

**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

Matheus Antunes Cerqueira

**Desenvolvimento de atividades  
experimentais e de um kit de experimentos  
sobre geração fotovoltaica**

PETRÓPOLIS 2019



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA**

**CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**CEFET/RJ – UnED PETRÓPOLIS**

**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**Desenvolvimento de atividades experimentais e de um kit de experimentos sobre geração fotovoltaica**

Matheus Antunes Cerqueira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciatura em Física.

Orientador: Daniel Neves Micha

PETRÓPOLIS 2019

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ – *Campus* PETRÓPOLIS  
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Desenvolvimento de atividades experimentais e de  
um kit de experimentos sobre geração fotovoltaica.**

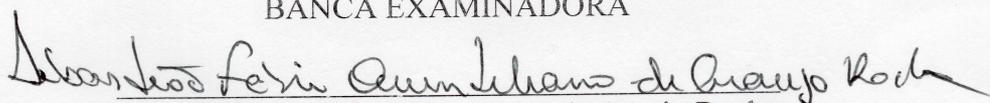
Matheus Antunes Cerqueira

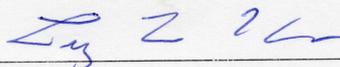
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao CEFET/RJ – *campus* Petrópolis, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
Licenciado em Física.

Orientador: Daniel Neves Micha

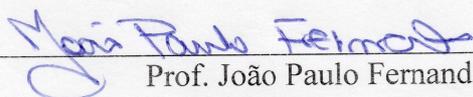
Aprovado em

**BANCA EXAMINADORA**

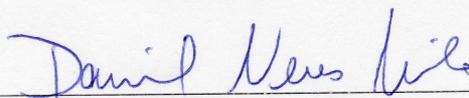
  
Prof. Sebastião Fabio Quintiliano de Araujo Rocha



Prof. Luiz Fernando Magalhães Cordeiro



Prof. João Paulo Fernandes



Prof. Daniel Neves Micha

Junho 2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio eletrônico ou convencional, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Cefet/RJ – Sistema de Bibliotecas / *campus* Petrópolis

C417

Cerqueira, Matheus Antunes.

Desenvolvimento de atividades experimentais e de um kit de experimentos sobre geração fotovoltaica / Matheus Antunes Cerqueira. - 2019.  
99f.

Trabalho de conclusão de curso (Curso de Licenciatura em Física) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Petrópolis (RJ), 2019.

Bibliografia: f. 67 - 72.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Neves Micha.

1. Geração Fotovoltaica. 2. Geração de energia solar fotovoltaica - Kit didático. I. Micha, Daniel Neves. (orient.). II. Título.

CDD 621.31244

Elaborada por Luciana de Souza Castro CRB7/4812

*Ao meu pai e minha mãe.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente ao SENHOR, pelo cuidado em me manter Seu e pela oportunidade de iniciar e concluir este trabalho.

Em especial aos meus pais, Generoso e Eliesete, e minha tia Elaine que foram meus suportes em todo esse período. Obrigado por serem compreensivos em todas as situações e pelas orações, vocês fazem parte deste trabalho. E ao meu irmão Gabriel, pela amizade, carinho e habilidade de transformar momentos ruins em momentos divertidos.

Ao professor Daniel pelo projeto destinado a mim e pela humanidade em toda condução deste trabalho, respeitando em todo o tempo meu tempo sem deixar de fazer as cobranças necessárias para que o trabalho sempre avançasse.

Ao professor Luiz Fernando, principal colaborador, que sempre se colocou a disposição para me auxiliar. Sem sua ajuda, sugestões e ideias todo trabalho teria sido muito mais difícil.

Gostaria de agradecer à Roberta Knopki e ao pessoal da GiZ pela disponibilização dos dados do EnergIF, a Felipe de Almeida e Mario Pin pela disponibilização dos planos de curso do IFSP campus Boituva e Manoel Pedrosa Filho pelo envio das fotos do curso do campus Pesqueira do IFPE. Ao CNPq pelos recursos financeiros para realização deste trabalho.

Ao grupo Mulher Única pelas orações.

Aos colegas de faculdade que estiveram presentes nesta trajetória preenchendo-a com suas amizades e colaborações: ao Wesley pela amizade e pela pescaria, a Débora pelas conversas ao longo do trabalho, ao Willian pelas sugestões e ideias. Ao corpo docente do CEFET/RJ UnED Petrópolis pela inestimável formação acadêmica que recebi.

*“Tu conservarás em paz aquele cuja mente está em Ti”  
(Bíblia Sagrada, Isaías 26.3)*

## Resumo

O presente trabalho visa a elaboração de atividades experimentais na forma de um kit de experimentos em geração de energia fotovoltaica. De forma mais específica, busca-se abordar os conceitos fundamentais da parte elétrica de uma célula fotovoltaica, como seus parâmetros elétricos, modos de operação e a influência de fatores externos na geração fotovoltaica. O contexto que embasa a necessidade deste trabalho é explorado nos capítulos 1 e 2. No capítulo 1, procura-se apresentar a presente mudança global e local na forma de gerar energia, a partir do uso de renováveis e suas tecnologias. Ainda, aponta-se a implicação dessa nova forma de gerar energia no mercado, produzindo um cenário de novas oportunidades de empregos e necessidade de mão de obra qualificada e especializada. No capítulo 2, é apresentado o contexto de formação profissional na área solar, bem como os incentivos e contribuições que essa área vem recebendo no Brasil através do programa EnergIF, fomentando a criação de cursos técnicos, materiais didáticos, itinerários formativos e capacitação de docentes na Rede Federal. Neste mesmo capítulo, procura-se referenciar o contexto de aplicação das atividades, cuja modalidade de ensino é prioritariamente técnica. No capítulo 3, é abordado o conteúdo teórico e técnico fundamental da geração de energia solar fotovoltaica enfatizando os principais conceitos no conhecimento e utilização da tecnologia fotovoltaica. No capítulo 4, a metodologia empregada na construção dos experimentos de baixo custo e elaboração das atividades na forma de “caixa aberta” é apresentada. Em seguida, no mesmo capítulo, são apresentadas as propostas didáticas para execução das atividades experimentais. Além disso, o protótipo utilizado para a realização das atividades é descrito e seu uso nos experimentos explicado com detalhes. No capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, onde são apontados os detalhes didáticos e técnicos das atividades experimentais propostas, e as perspectivas quanto à inserção de novos experimentos. Em anexo, incluímos roteiros para a realização de 4 (quatro) atividades em laboratório, com o objetivo de auxiliar o professor na aplicação dos experimentos aqui apresentados.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica, Atividade Experimental, Kit didático, EnergIF.

## Abstract

The present work aims at the elaboration of experimental activities in the form of an experimental kit on photovoltaic energy generation. More specifically, we intend to present experiments that address the fundamental concepts of the electrical part of a photovoltaic cell, such as its electrical parameters, modes of operation and the influence of external influences on them. The context behind this work is explored in chapters 1 and 2. In chapter 1, we present changes in the current global and local ways of generating energy, from renewable sources and its technologies. Also, we show data that point out the implication of this form of energy generation in the market, producing a scenario of new job opportunities and the need for skilled and specialized human resources. In chapter 2, we present the context of professional training in the solar energy field, as well as the incentives and contributions that this area has been receiving in Brazil through the EnergIF program, promoting the creation of technical courses, didactic materials, training itineraries and teacher training in the Federal Network. In this same chapter, we reference the application context of the activities, whose teaching modality is primarily technical. In Chapter 3, the basic theoretical and technical content of solar photovoltaic energy generation is described, emphasizing the main concepts in the knowledge and use of photovoltaic technology. In Chapter 4, the methodology used in the construction of the low cost experiments and elaboration of the activities in the form of "open box" is presented. Then, in the same chapter, the didactic proposals for experimental activities are presented. In addition, the prototype used for carrying out the activities is described and its use in the experiments thoroughly explained. In chapter 5, the final considerations are presented, where the didactic and technical details of the proposed experimental activities are indicated as well as the perspectives for the insertion of new experiments. In the appendix, we include guides for the accomplishment of 4 (four) laboratory activities, with the purpose of assisting the teacher in the application of the experiments presented here.

**Keywords:** Photovoltaic Energy, Experimental Activities, Didactic Resource, EnergIF.

## Lista de Figuras

Figura 2:1: Utilização de telhados didáticos em práticas de campo e práticas envolvendo uso e configuração de módulos fotovoltaicos em <i>strings</i> .....	25
Figura 3:1: Elétrons, portadores de carga, sendo promovidos da banda de valência para a banda de condução por excitação térmica e criando uma lacuna, portador de carga, na banda de valência. ....	27
Figura 3:2: (a) Inserção de átomos de arsênio (As) à rede de silício (Si) a fim de ceder elétrons à rede (b) e de índio (In) a fim de criar lacunas na rede após a captura de elétrons da banda de valência.....	28
Figura 3:3: Processo eletrônico na formação da junção região de carga espacial em uma junção pn. ....	28
Figura 3:4: Corte transversal de uma célula fotovoltaica. ....	29
Figura 3:5: Curva I-V e P-V de uma célula solar típica de silício sob iluminação.....	30
Figura 3:6:Componentes utilizados na montagem de um módulo solar. ....	32
Figura 3:7: (a) Aumento de corrente na curva I-V de uma associação em paralelo. (b) Aumento de tensão na curva I-V de uma associação em série. ....	33
Figura 3:8: Dados elétricos obtidos sob as STC para um módulo de Si policristalino: irradiância de $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de $25^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5g.....	33
Figura 3:9: Associação de módulos na configuração de um sistema fotovoltaico.....	34
Figura 3:10: (a) Entrelaçamento convencional de módulos. (b) Entrelaçamento <i>leapfrog</i> de módulos.....	35
Figura 3:11: Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo. ....	36

Figura 3:12: Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. ....	37
Figura 3:13: Efeitos (a) da irradiância e (b) da temperatura na curva I-V de um módulo solar. ....	38
<i>Figura 3:14: Componentes da irradiância solar: difusa (<math>G_{dif}</math>), extraterrestre (<math>G_0</math>), direta (<math>G_{dir}</math>) e albedo.....</i>	<i>40</i>
Figura 3:15: Cálculo do fator Massa de Ar para uma posição arbitrária do sol em relação ao zênite (ponto de referência). ....	40
Figura 3:16: Distribuição espectral da irradiância sob condições de AM: AM0 – espectro extraterrestre, AM 1.5g – espectro terrestre global e AM1.5d – espectro terrestre direto.....	41
Figura 3:17: Dados elétricos na condição NOCT e coeficientes de temperatura de um módulo solar de Si policristalino. ....	42
Figura 3:18: Utilização dos diodos de desvio e diodos de bloqueio em sistemas fotovoltaicos: (a) Diodo de desvio entre fileiras de célula em série e (c) diodos de bloqueio utilizados na saída de módulos em paralelo. Em (b), um esquema do uso do diodo de desvio na situação (a) é apresentado. ....	44
Figura 4:1: Componentes usados na fabricação dos módulos. ....	50
Figura 4:2: Módulo Fotovoltaico. ....	52
Figura 4:3: Módulo de Carga.....	52
Figura 4:4: Módulo de Dispositivos Luminosos. ....	53
Figura 4:5: Módulo de Armazenamento. ....	53
Figura 4:6: (a) Utilização dos Módulos Fotovoltaico e Armazenamento. (b) Utilização dos Módulos Armazenamento e de Dispositivos Luminosos. (c) Utilização dos Módulos Fotovoltaico e de Dispositivos Luminosos.....	56

Figura 4:7: (a) Curva I-V e (b) curva P-V construída com os dados da tabela 4-1 e com o uso do <i>software SciDavis</i> . .....	59
Figura 6:1: Conexão em série das células no Módulo Fotovoltaico. ....	73
Figura 6:2: Conexão em paralelo das pilhas no Módulo Armazenamento. ....	75
Figura 6:3: Conexão em série das pilhas do Módulo Armazenamento. ....	76
Figura 6:4: Conexão em série de células. ....	82
Figura 6:5: Conexão em paralelo de células .....	83
Figura 6:6: Associação mista de células .....	83

## Lista de Tabelas

Tabela 4-1: Dados obtidos de corrente, tensão e potência para construção das curvas I-V e P-V.....	58
Tabela 4-2: Dados de tensão e corrente para uma associação de células em série.....	61
Tabela 4-3: Dados de tensão e corrente para uma associação em paralelo das células.....	61
Tabela 4-4: Dados de corrente e tensão para distâncias variadas da fonte de luz em relação as células para verificação da influência da irradiância na produção de energia.....	63
Tabela 4-5: Dados obtidos de temperatura e tensão para a verificação da influência da temperatura na produção de energia. ....	63
Tabela 4-6: Dados de corrente para uma série de células solares com sombreamento. ....	63
Tabela 4-7: Dados de corrente para células solares em paralelo com sombreamento. ....	64

# Sumário

<b>1</b>	<b>Panorama energético-econômico e o segmento de renováveis</b>	<b>15</b>
1.2	Dados de energia no Brasil e no mundo .....	16
1.3	Mercado atual de energia renovável: histórico da geração de empregos no Brasil e no mundo.....	17
1.4	Previsão de crescimento do mercado e necessidade de mão de obra para próximos anos .....	18
<b>2</b>	<b>Formação profissional na área solar</b> .....	<b>21</b>
2.1	Iniciativa EnergIF .....	21
2.2	Itinerários Formativos .....	23
2.3	Exemplo de curso e infraestrutura de laboratórios .....	24
<b>3</b>	<b>Energia Solar Fotovoltaica</b> .....	<b>26</b>
3.1	Descrição do funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	26
3.1.1	Desempenho elétrico da célula fotovoltaica .....	29
3.2	Breve descrição do funcionamento de um módulo fotovoltaico.....	32
3.3	Breve descrição do funcionamento de um sistema fotovoltaico .....	34
3.4	Fatores que influenciam a geração fotovoltaica de energia .....	37
3.4.1	Irradiância .....	38
3.4.2	Temperatura .....	41
3.4.3	Sombreamento.....	43

<b>4</b>	<b>Propostas didáticas .....</b>	<b>45</b>
4.1	Levantamento de experimentos para demonstração dos conceitos (em nível comercial e experimental).....	45
4.2	Atividades Experimentais .....	47
4.2.1	Desenvolvimento de protótipo de kit de geração fotovoltaica .....	48
4.2.2	Propostas de atividades experimentais .....	54
<b>5</b>	<b>Considerações finais e Perspectivas.....</b>	<b>65</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>71</b>
	Atividade 1: Conhecendo o fenômeno de conversão fotovoltaica .....	72
	Atividade 2: Medindo o desempenho elétrico de uma célula solar.....	78
	Atividade 3: Associação de células solares em série e paralelo .....	82
	Atividade 4: Investigando a Influência da Irradiância, Temperatura e Sombreamento .....	86
	Anexo E: Exemplos de Plano de Ensino Técnico .....	93

# 1 Panorama energético-econômico e o segmento de renováveis

## 1.1 Questão energética e ambiental no mundo

A constante necessidade de energia, independente de sua modalidade, é notória na atual sociedade. Para garantir os direitos básicos do ser humano como saúde, educação, alimentação e segurança e atender outras atividades humanas mais complexas é fundamental atender à crescente demanda energética mundial, através do controle de sua geração e do uso. Essa demanda é consideravelmente alta para a manutenção dos padrões atuais de vida e cresce com o aumento da população, da expectativa de vida e da disponibilidade de seu uso (MICHA et al., 2018). No ano de 2018, a demanda por energia no mundo cresceu 2,3%, configurando o maior crescimento da década (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Sabe-se que para gerar energia, torna-se necessário explorar recursos naturais que se tornam as próprias fontes de energia. No contexto mundial, os principais recursos explorados são combustíveis fósseis, carvão e petróleo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Ambas são fontes finitas de energia, não renováveis na escala de tempo humana, e sua utilização (queima) acarreta emissões de gases de efeito estufa (GEE), prejudiciais ao meio ambiente se não controladas.

A exploração desses recursos naturais essenciais, porém finitos, levará a sua escassez implicando em consequências exploratórias limitantes, como o crescente custo econômico e ambiental do uso dessas fontes, conforme Brown (2009, apud CHAGAS et al., 2012) explica:

Podemos começar pela escassez do petróleo... existe um termo que se chama pico do petróleo, segundo o pesquisador da Ericson, Ruberts, o pico do petróleo acontece quando o custo de tirar o petróleo do solo passa a aumentar gradativamente...Isso significa que a partir do momento em que se atinge o pico, a tendência do preço do petróleo é aumentar cada vez mais e de forma exponencial, ou seja, a cada ano ele aumenta um pouco mais do que no ano anterior, conseqüentemente, a era do petróleo abundante dará por terminada.

Além do problema da escassez, o aumento da emissão de GEE, condição impulsionada pelo uso de combustíveis fósseis, pode produzir mudanças significativas no clima do planeta, aumentando sua temperatura média global. Conseqüentemente, pode-se vivenciar complicações sérias no meio ambiente como aumento do nível do mar, períodos secos agravados em locais de maior aridez, perda de biodiversidade, entre outros impactos negativos causados pela mudança climática (ALLEN et al., 2018). O reconhecimento dos problemas ambientais expostos, derivados em parte do uso de fontes de energia não renováveis, e da necessidade de mudança são problemas de dimensões internacionais. O Acordo de Paris, COP21 (21ª Conferência das Partes) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês) realizada em dezembro de 2015, cujo Brasil é signatário dentre os 195 países (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016) torna evidente as preocupações. No contexto do acordo, a Contribuição Nacional Determinada do Brasil (NDC na sigla em inglês), documento que estabelece as metas para cumprimento do acordo, compreende e prevê uma manutenção substancial nos segmentos do setor energético para alcançar seus objetivos de redução do aumento da temperatura média global e emissões de GEE. A NDC visa alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016), como um de seus objetivos.

Portanto, torna-se necessário explorar e induzir o uso de fontes de energia renováveis e menos poluidoras para sustentar a demanda de energia sem comprometer o meio ambiente, possibilitando um crescimento sustentável e acessível para as próximas gerações.

## **1.2 Dados de energia no Brasil e no mundo**

Na matriz energética de um país ou região encontra-se a demanda total de energia e as fontes utilizadas para a sua geração, sejam elas de origem renovável ou não renovável. Um caso particular da matriz energética é a matriz elétrica que informa as fontes de energia usadas para a geração apenas de energia elétrica.

Portanto, a matriz energética de um país ou região não diz respeito somente à demanda de energia necessária para movimentar sua economia, mas também da capacidade de poluir seu ambiente.

Em comparação com o mundo, o Brasil tem apresentado um compromisso maior com o segmento de energias renováveis. Do total da energia primária produzida no Brasil em 2017, 42,9% foi oriunda de fontes renováveis de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018), enquanto na média mundial, em 2016, apenas 14% da energia primária foi produzida a partir destes recursos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Essa diferença cresce ainda mais quando comparamos a matriz elétrica brasileira, com 80,33% de participação (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018) contra apenas 24,3% da mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). A base da matriz energética brasileira ainda é não renovável, apenas a matriz elétrica mostra-se majoritariamente renovável, porém os avanços em relação ao uso de renováveis superam em muito o contexto mundial.

### **1.3 Mercado atual de energia renovável: histórico da geração de empregos no Brasil e no mundo**

Devido em partes a políticas de sustentabilidade, situadas em acordos internacionais e compromissos internos de países signatários, uma mudança na forma de gerar energia vem ocorrendo em função da inserção de segmentos de energia renovável. Conseqüentemente, o mercado de trabalho na área de renováveis vem usufruindo de significativo aumento em decorrência dessa nova demanda. Segundo a International Renewable Energy Agency (2017) o setor global de energias renováveis empregou diretamente e indiretamente 9,8 milhões de pessoas em 2016, com um aumento de 1,1% sobre o ano de 2015. Se desconsiderarmos grandes hidrelétricas, esse aumento sobe para 2,8% com o número de 8,3 milhões de empregos em renováveis em 2016. O aumento mais consistente vem das categorias solar fotovoltaica e eólica, mais que dobrando desde 2012. O Brasil encontra-se entre os países que mais contabilizam empregos em

energia renovável, junto com China, Estados Unidos, Índia, Japão e Alemanha. A mudança na demanda de geração de energia, entretanto, não é de agora. Desde a década de noventa do século passado as energias renováveis crescem em uma velocidade maior que a produção geral de eletricidade (FARIAS, 2018), vide a participação delas na matriz elétrica mundial e brasileira que representaram 24,3% e 80,3% da produção total de energia, respectivamente. Segundo o mesmo autor, o setor de renováveis no Brasil empregou 893 mil pessoas. Algumas categorias de renováveis, entretanto, tem apresentado decréscimo na geração de empregos. Em países como o Japão e alguns pertencentes à União Europeia, a modalidade solar fotovoltaica sofre enfraquecimentos. Contudo, esses países são pioneiros na utilização dessa modalidade e já contam com um histórico positivo de investimentos e políticas de ação na categoria, servindo de exemplo para outros países alcançarem a consolidação do mercado dessa modalidade. Apesar desse declínio em alguns países, a energia solar fotovoltaica é a que mais emprega no mundo, com 3,1 milhões de empregos (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2017). No Brasil, China e União Europeia, empregos em aquecimento e arrefecimento solar tem experimentado uma queda de 12% em função da desaceleração de instalações.

Tanto o histórico como o quadro atual de mercado e geração de empregos em energias renováveis apresentam-se positivos no tocante a crescimento de oportunidades. Os projetos de sustentabilidade, acordos internacionais e compromissos que visam o investimento na área têm criado grandes expectativas de um aumento maior na demanda de energias renováveis e geração de empregos.

#### **1.4 Previsão de crescimento do mercado e necessidade de mão de obra para próximos anos**

A Nova Perspectiva Energética de 2018 da organização de pesquisa Bloomberg NEF enxerga um investimento global de 11,5 trilhões de dólares em nova capacidade de geração de energia entre 2018 e 2050, com 8,4 trilhões indo para as categorias de energia solar e energia eólica, os outros 1,5 trilhão para outras

tecnologias de zero carbono como hidrelétricas e nuclear (BNEF, 2018). Da mesma organização de pesquisa, a previsão é de que em 2050, 50% da demanda de energia elétrica mundial seja providenciada por tecnologia eólica e solar. Dessa perspectiva de investimento no setor, deduz-se uma previsão de crescimento desse mercado e sua permanência por vários anos. Como resultado, a necessidade de mão de obra qualificada também cresce estimulando a geração de novos empregos.

No Brasil, a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), estima, de modo conservador, que o potencial de investimento da energia fotovoltaica em telhados de galpões e armazéns é de 6,8 bilhões de reais (ABSOLAR, 2017). Ainda, segundo a mesma entidade, se apenas metade da área dos telhados de galpões e armazéns ocupados no Brasil fosse aproveitada para gerar energia elétrica renovável pela fonte fotovoltaica, a geração de empregos diretos seria da ordem de 30 mil postos de trabalho, sendo este apenas um dos cenários da utilização da energia fotovoltaica. Sistemas de mini e micro-geração e leilões de energia tem impulsionado empreendimentos fotovoltaicos por todo o Brasil revelando grande necessidade de mão de obra qualificada. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 da Empresa de Pesquisa Energética, apresenta o resultado consolidado da projeção da capacidade instalada de mini e micro-geração de energia indicando 87% de participação fotovoltaica, 10,44 GW dos 12 GW previstos, em 2027 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Da mesma maneira, para energia eólica, espera-se que a tendência de crescimento do mercado e necessidade de mão de obra permaneça, dado que, segundo o mesmo plano decenal da EPE, a capacidade instalada de geração elétrica centralizada no sistema interligado seja incrementada em 116%, de 2017 a 2027.

Os dados apresentam grandes tendências de crescimento do mercado de renováveis e necessidade de mão de obra. Entretanto, torna-se necessário garantir que a formação de mão de obra para suprir essa necessidade obtenha alto grau de qualidade, dado que a eficiência dessas tecnologias necessita de aptidão técnica para reconhecer as condições de melhor aproveitamento, influenciando também em sua reputação e reconhecimento por parte da população como investimento agregador. Os cursos de formação, portanto, são partes essenciais para oferecer

mão obra de obra qualificada e certificada, pronta para atuar no mercado de trabalho.

## **2 Formação profissional na área solar**

A atuação profissional na área solar, especificamente na implementação de um sistema fotovoltaico requer um conjunto de profissionais que atuem em níveis diferentes de conhecimento e formação técnica. De modo geral para esse mercado, os perfis variam de pesquisadores da tecnologia, instaladores do sistema, especialistas, engenheiros, consultores, vendedores, entre outros. Entretanto, são os instaladores e especialistas de nível técnico e de nível superior que atuam diretamente na execução de um sistema fotovoltaico. Como parte essencial e estratégica no mercado, a formação profissional destes últimos perfis tem sido objetivada em diversos cursos técnicos de iniciativa privada e pública pelo Brasil.

Na esfera pública, a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica, também conhecida por Rede Federal, tem ofertado cursos técnicos, tecnológicos e pós-graduações em energias renováveis visando atender à necessidade atual dos perfis profissionais exigidos pela demanda do setor. Entretanto, conforme discutido, é necessário um quantitativo de cursos ajustado à demanda de profissionais e que forneçam um ensino profissionalizante de qualidade, respondendo às necessidades de aptidão técnica necessárias para conduzir a tecnologia implantada com eficiência. Para alcançar esses objetivos, a Rede Federal dispõe do Programa para Desenvolvimento em Energias Renováveis e Eficiência Energética na Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica – EnergIF. O programa instaurado pelo Ministério da Educação (MEC), por meio da Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), visa induzir a cultura do desenvolvimento de energias renováveis e eficiência energética na Rede Federal (ENERGIF, 2019), fundamental para atender a certificação de qualificação e capacitação profissional em energias renováveis.

### **2.1 Iniciativa EnergIF**

As ações do EnergIF foram iniciadas no ano de 2015 com a criação de Grupos de Trabalho temáticos, nas áreas de Energia Solar Fotovoltaica, Biogás e

Biometano, Energia Eólica, Biocombustíveis e Eficiência Energética, orientadas pelo MEC em convênio com a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Junto a estas instituições, o programa também é apoiado pelo Núcleo de P&D para Excelência e Transformação do Setor Público (NEXT), da Universidade de Brasília (UnB), e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (ENERGIF, 2019).

O programa apresenta quatro eixos estratégicos e um temático como norteadores de suas ações. Um desses eixos estratégicos é o de Formação Profissional. Seus objetivos, conforme o programa, desdobram-se em implantar os cursos pilotos nas áreas temáticas dos Grupos de Trabalho; capacitar docentes da Rede Federal para atuação como multiplicadores em Energias Renováveis e Eficiência Energética; acompanhar as ações quanto à certificação profissional em energias renováveis.

O programa EnergIF já conta com resultados substanciais como a criação e regulamentação dos Grupos de Trabalho em Formação Profissional em Energias Renováveis e Eficiência Energética, sendo um deles o Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica (PEDROSA FILHO et al., 2018). Há também os resultados parciais das ações conduzidas pelo programa, representativo no âmbito da educação profissionalizante e tecnológica, apresentando 190 docentes da Rede Federal capacitados (72 em fotovoltaica), 10 itinerários formativos elaborados (nas áreas de Fotovoltaica, Biogás, Eólica e Eficiência Energética) e 22 locais que já oferecem cursos de formação nas áreas de energias renováveis e eficiência energética segundo os itinerários formativos, (16 em energia solar fotovoltaica), entre outros resultados. (KNOPKI; JULIATTO, 2018)

Portanto, o atual contexto, favorecido pela iniciativa EnergIF, contempla uma melhor estruturação, embasamento e orientação da educação profissionalizante e tecnológica na área de energias renováveis em particular em energia fotovoltaica.

## 2.2 Itinerários Formativos

Os itinerários formativos elaborados no âmbito do programa EnergIF estabelecem e orientam o conteúdo a ser ministrado nos cursos de formação. Sobre parte da metodologia empregada em sua elaboração, os autores dos itinerários, que fazem parte do Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica, expressam:

Para atender as exigências técnicas e a demanda por profissionais aptos a trabalhar com a tecnologia fotovoltaica, a GIZ apoiou o MEC a identificar os perfis de profissionais com as competências técnicas necessárias e a desenvolver novas ofertas de educação profissional na área fotovoltaica, considerando as particularidades do sistema educacional existente no país. (PEDROSA FILHO et al., 2018)

Os itinerários são referentes, portanto, a três perfis de profissionais. São eles: curso de Formação Inicial e Continuada (FIC) de Instalador Fotovoltaico, curso de FIC de Especialista Técnico, direcionado à profissionais que já possuem o curso técnico de nível médio em áreas afins, e curso de Especialização Técnica em Energia Solar Fotovoltaica, em nível de pós-graduação lato sensu voltado a profissionais com curso superior em áreas afins (ENERGIF, 2018).

O itinerário formativo para cada perfil apresenta conteúdos de acordo com o nível educacional selecionado e estabelece competências e habilidades necessárias a cada formação. No entanto, há unidades curriculares que são comuns a todos os perfis profissionais e que servem exclusivamente aos propósitos deste trabalho. De acordo com os itinerários, encontra-se as seguintes unidades curriculares comuns aos perfis profissionais:

- Eletricidade Básica Aplicada a Sistemas Fotovoltaicos;
- Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica;
- Tecnologia Fotovoltaica: Módulos, Arranjos, Células;
- Sistemas Fotovoltaicos: Isolados e Conectados à Rede.

Estas unidades compõem o módulo básico e parte do módulo específico da matriz curricular de cada perfil apresentado. Os conteúdos destas unidades encerram conceitos fundamentais para o entendimento da tecnologia a ser empregada e da implementação de um sistema fotovoltaico, bem como o melhor

modo de implementá-lo. Por esse caráter fundamental, entende-se que estes conceitos requerem investimento em seu ensino, recebendo novas propostas e estratégias a fim de enriquecê-lo.

### **2.3 Exemplo de curso e infraestrutura de laboratórios.**

O Instituto Federal de Educação Científica e Tecnológica de São Paulo (IFSP) Campus Boituva, participante da Rede Federal, oferta o curso FIC de instalador de sistemas fotovoltaicos orientado pelo itinerário. Conforme o formulário-síntese da proposta do curso e seus planos de ensino, a carga horária total do curso é de 160 horas, divididas em 6 unidades curriculares de acordo com sua especificidade. O curso é desenvolvido em um semestre, com o número de vagas restrito a vinte matrículas. É destinado a técnicos e engenheiros que já atuam na área, jovens e adultos com o ensino fundamental completo e mais de 18 anos de idade. Para cada unidade curricular, há o seu plano de ensino contendo a abordagem metodológica, necessidade de uso de laboratório, ementa, objetivos, metodologia, conteúdo programático, bibliografia básica e complementar. A metodologia do curso segue aulas teóricas expositivas/dialogadas, exercícios de fixação, utilizando quadro negro/giz ou similar e projetor multimídia, além de aulas práticas em laboratório específico e em campo.

O plano de ensino da unidade curricular Tecnologia Fotovoltaica contempla os conceitos científicos discutidos nas atividades aqui propostas e mostra especificamente em que momento poderão ser utilizadas durante o curso. As atividades, portanto, fazem parte e podem ser integradas ao currículo programático, respeitando a metodologia e seguindo os objetivos propostos no plano. O plano de ensino de interesse que concorda com as propostas do itinerário elaborado pelo EnergIF se encontra no Anexo E.

Telhados didáticos e laboratórios de eletricidade compõem principalmente a infraestrutura de laboratórios necessária ao curso. Nos telhados didáticos, o aluno consegue praticar a instalação de um sistema fotovoltaico de acordo com as especificações de cada projeto, análise técnica, dimensionamento, fatores

relevantes a eficiência e segurança do sistema, entre outros. Conceitos básicos de eletricidade e da tecnologia fotovoltaica podem ser explorados nos laboratórios de eletricidade. As fotos da Fig. 2.1 mostram algumas atividades sendo realizadas no Campus Pesqueira do Instituto Federal de Pernambuco, que também oferece o curso FIC de instalador.

Figura 2:1: Utilização de telhados didáticos em práticas de campo e práticas envolvendo uso e configuração de módulos fotovoltaicos em *strings*.



Fonte: Imagens cedidas por Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

No curso referenciado, das unidades curriculares identificadas como comuns aos perfis profissionais, apenas uma não apresenta necessidade do uso de laboratórios e atividades experimentais, parte do curso direcionada a normas de segurança. De fato, trata-se de um curso técnico com ampla necessidade de conhecimento de campo e atividades práticas na maioria dos componentes curriculares.

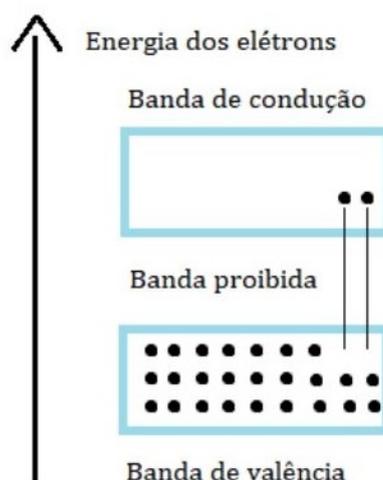
## 3 Energia Solar Fotovoltaica

### 3.1 Descrição do funcionamento de uma célula fotovoltaica

A conversão de energia luminosa em energia elétrica acontece através do efeito fotovoltaico. As células solares são os dispositivos tecnológicos que exploram o fenômeno a fim de converter a luz do sol em energia elétrica. Existem diversos tipos de células solares, ou fotovoltaicas, mas as mais utilizadas comercialmente são as de silício cristalino compondo 97.5% do mercado (FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, 2019).

A célula fotovoltaica é um dispositivo composto por materiais semicondutores que recebem tratamentos químicos diferentes. A partir da teoria de bandas, pode-se entender o comportamento elétrico dos materiais semicondutores. Estes materiais possuem sua banda de condução totalmente vazia enquanto sua banda de valência está totalmente cheia na temperatura de zero absoluto (REZENDE, 2015). A diferença energética entre essas bandas, chamada de *gap* de energia ou banda proibida, deve ser inferior a 3 eV, para configurar o comportamento semicondutor no material. Para materiais formados por átomos de silício o *gap* de energia é da ordem de 1,12 eV (REZENDE, 2015). Na temperatura de zero absoluto, estes materiais comportam-se como isolantes e, à medida que seus elétrons são excitados termicamente, à temperatura ambiente, por exemplo, recebem energia suficiente para superar a banda proibida e habitarem a banda de condução tornando-se capazes de conduzir eletricidade sob efeito de um campo elétrico externo. Os elétrons ao deixarem a banda de valência para a banda de condução geram lacunas na banda de valência, ou buracos, de forma que estas, na eletrodinâmica dos semicondutores, são modeladas como portadores de carga positiva, pois também são deslocadas sob efeito de um campo elétrico e contribuem para a condutividade no material (REZENDE, 2015).

Figura 3:1: Elétron, portador de carga, sendo promovido da banda de valência para a banda de condução por excitação térmica e criando uma lacuna, portador de carga, na banda de valência.

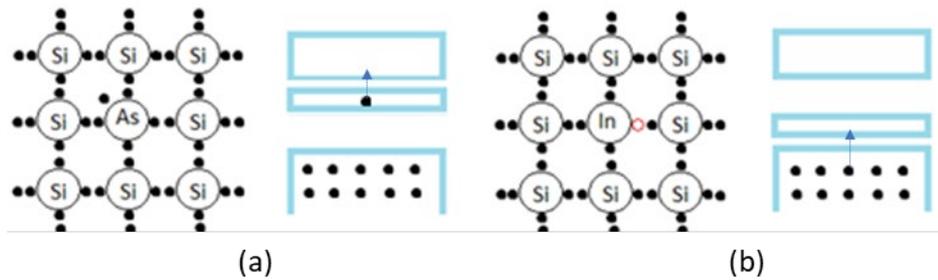


Fonte: Autor.

A versatilidade dos materiais semicondutores reside na possibilidade de controlar a sua condutividade e a carga dos portadores majoritários através da inserção de átomos diferentes em sua estrutura cristalina, de forma que ao ligarem-se à estrutura possam aumentar o número de portadores de carga, sejam lacunas ou elétrons. Esta técnica é denominada de dopagem eletrônica (REZENDE, 2015).

Em uma rede cristalina de silício (Si), que é um elemento químico tetravalente, pode-se inserir átomos pentavalentes, tais como arsênio (As) ou fósforo (P), de modo que ao cristalizarem junto à rede de silício deixarão um elétron praticamente livre. Ao dopar um material semicondutor desta maneira, adicionam-se portadores de carga negativa, configurando um material tipo n. Da mesma maneira, pode-se inserir átomos trivalentes, tais como o índio (In) ou o boro (B), na rede de silício de modo que ao cristalizarem junto à rede deixarão uma lacuna entre suas ligações. Ao dopar um material semicondutor desta maneira, adicionam-se lacunas, portadores de carga positiva, configurando um material tipo p. A figura 3.2 ilustra a inserção de átomos dopantes na rede e sua influência nas bandas de energia do material.

Figura 3:2: (a) Inserção de átomos de arsênio (As) à rede de silício (Si) a fim de ceder elétrons à rede (b) e de índio (In) a fim de criar lacunas na rede após a captura de elétrons da banda de valência.



Fonte: Autor.

Ao unir estes dois tipos de materiais, tipo n e tipo p, ocorre a difusão de elétrons e lacunas entre eles até que o equilíbrio seja atingido e uma região de carga espacial seja formada. Este processo é desejado, pois essa região, configura um campo elétrico no material, passível de separar os portadores de carga, fenômeno necessário para o aproveitamento de tensão e corrente em um dispositivo fotovoltaico (PINHO: GALDINO, 2014). A figura 3.3 ilustra o processo.

Figura 3:3: Processo eletrônico na formação da junção região de carga espacial em uma junção pn.

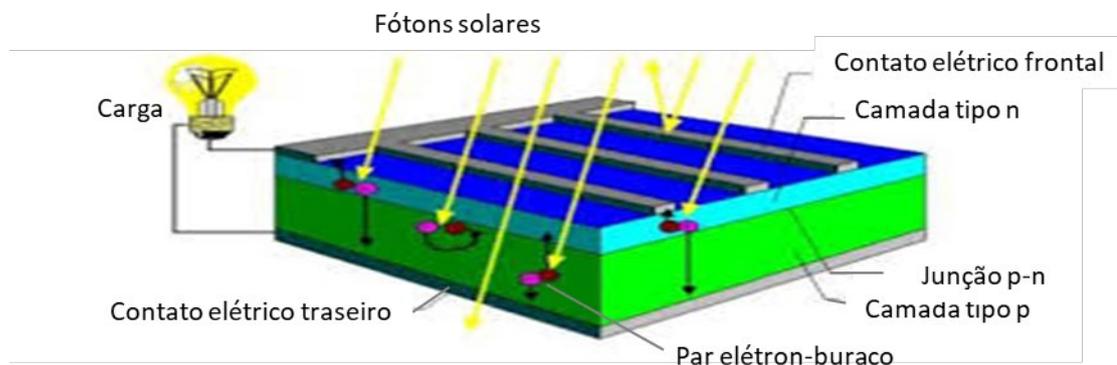


Fonte: (GREENPRO, 2004, adaptado para o português)

A região espacial com ausência de cargas elétricas livres (depletadas após a difusão) também é denominada região de depleção, donde se define o potencial elétrico da junção (e um campo elétrico intrínseco), que depende de características do material. Genericamente, a junção p-n também é chamada de diodo de junção. Como exemplo, pode-se citar o silício, que à temperatura ambiente, 25 °C, apresenta uma barreira de potencial de 0,7 V (REZENDE, 2015).

É possível reforçar a condutividade desses materiais através da fotoexcitação. Essa contribuição aumenta com a intensidade da luz e cai a zero quando se desliga a fonte de luz (REZENDE, 2015). Iluminando-se a junção p-n, fótons com energia suficiente podem elevar elétrons da banda de valência para a banda de condução no material, gerando assim o conjunto de portadores de carga elétrica, par elétron-buraco, responsáveis pela condução da energia elétrica no dispositivo. Após a geração, a tensão elétrica da junção promove a condução dos elétrons e dos buracos até diferentes contatos elétricos, que são dispostos no topo e na base do dispositivo. Com isso, o fluxo de energia elétrica é direcionado para a carga, que a utiliza utilmente.

Figura 3:4: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

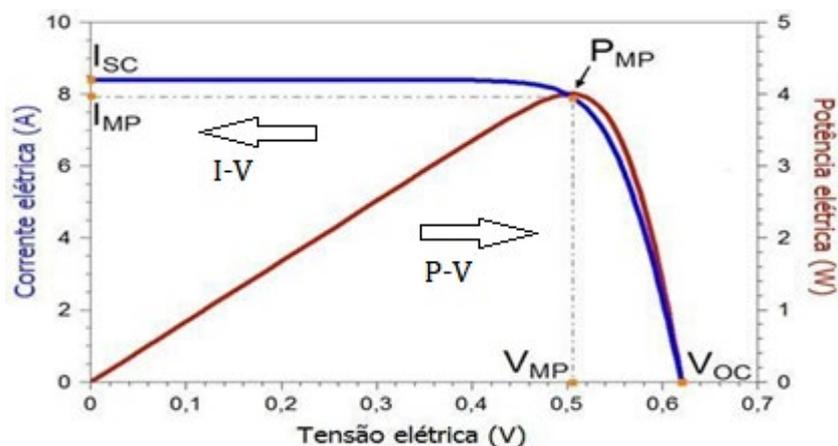


Fonte: (LOPEZ, 2012, p.90, adaptado).

### 3.1.1 Desempenho elétrico da célula fotovoltaica

O desempenho elétrico de uma célula fotovoltaica é inferido a partir de sua curva I-V. Dela, pode-se obter a potência que o dispositivo pode fornecer em função da tensão em seus terminais, curva P-V. Exemplos de curva I-V e P-V são apresentados na Figura 3.5.

Figura 3:5: Curva I-V e P-V de uma célula solar típica de silício sob iluminação.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014, p.120, adaptado).

Dessa curva, pode-se extrair os principais parâmetros que dão origem ao cálculo da eficiência do dispositivo:

- Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ): é a tensão elétrica máxima que uma célula fornece. Pode ser medida com um voltímetro em seus terminais aplicando uma carga de resistência muito grande, ou seja, quando não há corrente elétrica.
- Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ): é a corrente elétrica máxima que uma célula fornece. Pode ser medida com um amperímetro em seus terminais quando aplicada uma carga de resistência nula, ou seja, ocasionando um curto-circuito.
- Ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ): é o ponto específico na curva I-V onde tensão ( $V_{MP}$ ) e corrente ( $I_{MP}$ ) fornecem o maior valor de potência.
- Fator de Forma (FF): é a razão entre a potência máxima ( $P_{MP}$ ) e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto. É um conceito teórico que informa o quão próximo o desempenho da célula está de uma condição ideal onde não há perdas.

$$FF = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}}$$

- Eficiência ( $\eta$ ): Define o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014, p.120). A eficiência de uma célula fotovoltaica pode ser calculada a partir dos parâmetros definidos anteriormente e da potência solar incidente  $P_{inc}$  através da equação:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{inc}}$$

A eficiência de conversão fotovoltaica varia com o material empregado em sua fabricação. As células de silício cristalizado são do tipo monocristalino ou policristalino e apresentam em condições de teste padrão (STC)<sup>1</sup> eficiências médias de 24.7% e 19.8%, respectivamente (LOPEZ, 2012, p.100).

As células fotovoltaicas são dispositivos fabricados de modo a otimizar a absorção da energia solar, sua transformação em energia elétrica e sua condução até a carga. Para isso, ao longo do tempo, diversas inovações foram implementadas na estrutura de camadas do dispositivo de modo a permitir um aumento de sua eficiência. A  $I_{SC}$  que uma célula solar fornece, por exemplo, depende da área de captação e da reflexão que ocorre em sua superfície, da absorção da luz, que depende dos materiais utilizados, e da captação destes pelos contatos elétricos, que depende das propriedades da região de depleção, da qualidade do material, dentre outros. A densidade de corrente de curto-circuito da célula varia, então, de acordo com a tecnologia empregada. As de silício cristalino, por exemplo, apresentam valores entre 38 mA/cm<sup>2</sup> e 42,7 mA/cm<sup>2</sup> (PINHO; GALDINO, 2014, p.119). Outros fatores de construção do dispositivo, tais como o metal usado na definição dos contatos elétricos, processos térmicos aplicados, dentre outros, afetam fortemente a potência máxima a ser extraída da célula, pois aumentam a resistência em série ou reduzem a resistência em paralelo do dispositivo. O impacto desses fatores é no FF. Por fim, a  $V_{OC}$  é afetada pela recombinação das cargas elétricas, elétrons e buracos, geradas pela absorção da energia solar. A qualidade dos materiais empregados no dispositivo e das interfaces entre camadas ou grãos em um dispositivo multicristalino, por exemplo, é o principal fator de impacto nesta grandeza.

---

<sup>1</sup>As condições de teste padrão (STC) são utilizadas em laboratório e determinam valores específicos de irradiância, temperatura e massa de ar (AM) para ensaios de nível comercial. São eles: Irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25 °C e AM de 1,5g.

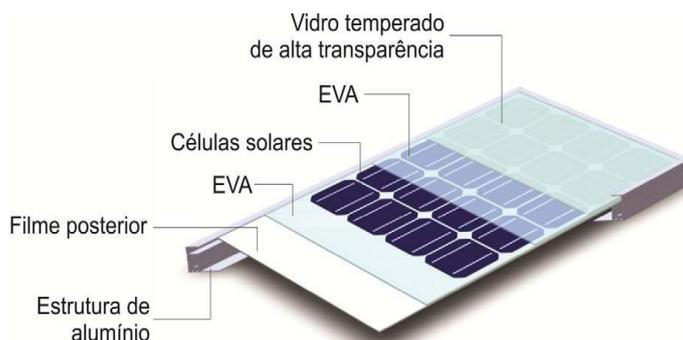
### 3.2 Breve descrição do funcionamento de um módulo fotovoltaico

A tensão elétrica que uma única célula fornece é muito pequena para aplicações reais. Para as de silício cristalino, encontram-se tensões entre 0,5V e 0,8V (PINHO; GALDINO, 2014, p.144). Entretanto, pode-se aumentar a tensão e, conseqüentemente a potência, associando as células em série em um módulo fotovoltaico, mantendo a corrente gerada pela associação constante. Para realizar esta conexão, o terminal negativo de uma célula é conectado ao terminal positivo da outra e assim sucessivamente.

Os módulos fotovoltaicos, portanto, são composições de células associadas em série com o intuito de alcançar a tensão e a potência desejadas. É possível associar as células em paralelo e assim aumentar a corrente fornecida mantendo a tensão constante. Entretanto, a maioria dos módulos disponíveis comercialmente visam o aumento de tensão. Assim, um módulo pode conter variados números de células solares de acordo com sua finalidade de tensão e potência. Módulos com 36 células associadas em série, por exemplo, normalmente fornecem uma  $V_{OC}$  de 18 V e uma  $V_{MP}$  de 12 V quando alimentando uma carga (LOPEZ, 2012, p. 105).

Além das células, o módulo é formado por outros componentes que visam o seu isolamento mecânico, térmico e elétrico. Para protegê-las, as células são encapsuladas com vidro temperado de alta transparência e uma camada de EVA na parte de cima. Na parte de baixo, mais uma camada de EVA, um filme isolante e, por fim, uma estrutura de alumínio anodizada (PINHO; GALDINO, 2014). A figura 3.6 ilustra o esquema de montagem de um módulo.

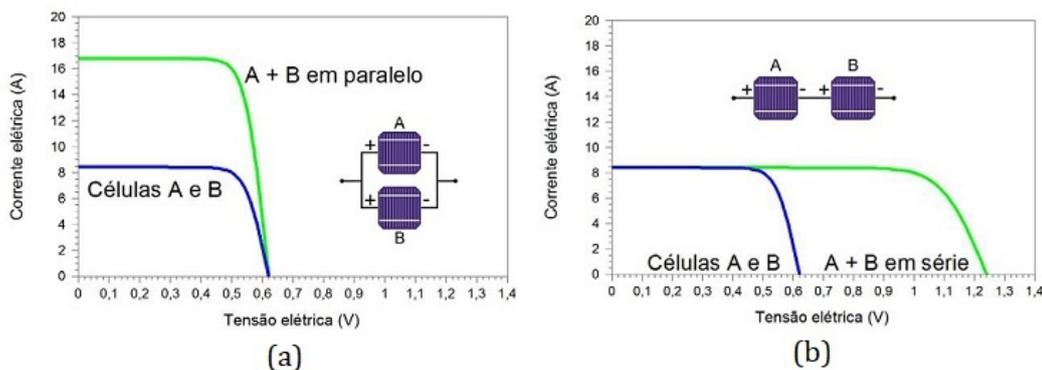
Figura 3.6: Componentes utilizados na montagem de um módulo solar.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014, p.132).

A unidade formadora do módulo solar, portanto, é a célula fotovoltaica. As características elétricas e desempenho do módulo dependerão exclusivamente das células utilizadas e da tecnologia escolhida. A curva I-V de um módulo pode ser obtida pela composição das curvas I-V das células, em acordo com o tipo de conexão, como ilustrado pela Figura 3.7.

Figura 3.7: (a) Aumento de corrente na curva I-V de uma associação em paralelo. (b) Aumento de tensão na curva I-V de uma associação em série.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014, pág. 124).

Os parâmetros elétricos de uma célula solar ou de um módulo solar fazem parte de seu detalhamento técnico ou *datasheet*. Como produto tecnológico, essas informações garantem ao consumidor o conhecimento necessário para as aplicações desejadas. Um exemplo de *datasheet* de um módulo solar é apresentado na Figura 3.8 de onde podem ser observados os dados elétricos e mecânicos do módulo.

Figura 3.8: Dados elétricos obtidos sob as STC para um módulo de Si policristalino: irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e espectro AM 1,5g.

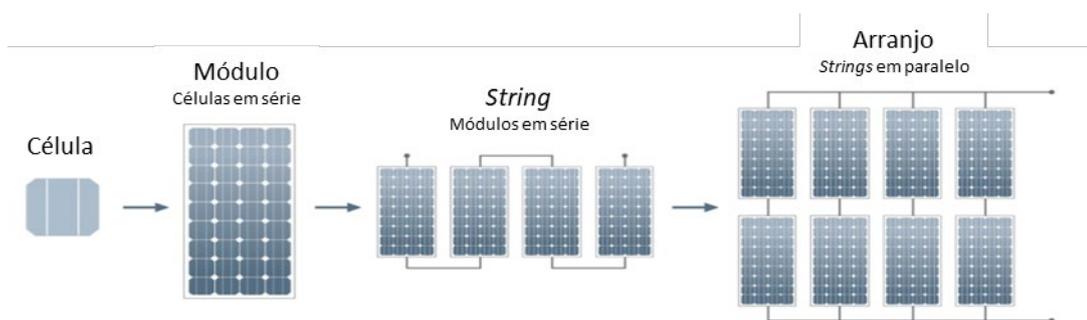
DADOS ELÉTRICOS/STC*					DADOS MECÂNICOS	
CS6U	315P	320P	325P	330P	Especificação	Dados
Potência nominal máx. (P <sub>máx</sub> )	315 W	320 W	325 W	330 W	Tipo de célula	Policristalino, 6 polegadas
Tensão operacional ideal (V <sub>mp</sub> )	36,6 V	36,8 V	37,0 V	37,2 V	Organização das células	72 (6 × 12)
Corrente operacional ideal (I <sub>mp</sub> )	8,61 A	8,69 A	8,78 A	8,88 A	Dimensões	1.960 × 992 × 40 mm (77,2 × 39,1 × 1,57 pol.)
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	45,1 V	45,3 V	45,5 V	45,6 V	Peso	22,4 kg (49,4 lb)
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	9,18 A	9,26 A	9,34 A	9,45 A	Tampa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Eficiência do módulo	16,20%	16,46%	16,72%	16,97%	Material da estrutura	Liga de alumínio anodizado
Temperatura operacional	-40 °C ~ +85 °C				Caixa de derivação	IP67, 3 diodos
Tensão máxima do sistema	1.000 V (IEC) ou 1.000 V (UL)				Cabo	4 mm <sup>2</sup> (IEC) ou 4 mm <sup>2</sup> e 12 AWG
Desempenho do módulo contra incêndio	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)				Conectores	T4 (IEC/UL)
Classificação máx. de fusíveis da série	15 A				Por palete	26 peças
Classificação da aplicação	Classe A					
Tolerância de potência	0 ~ + 5 W					

Fonte: (Canadian Solar, 2019, adaptado).

### 3.3 Breve descrição do funcionamento de um sistema fotovoltaico

Assim como as células, módulos fotovoltaicos também podem ser associados em série e em paralelo, determinando a tensão e corrente de acordo com a necessidade de geração e consumo de energia elétrica. Séries fotovoltaicas (*strings*) são compostas pelas conexões em série de módulos, enquanto os arranjos são montados das conexões em paralelo das séries. Ilustrações das conexões descritas podem ser vistas na Figura 3.9.

Figura 3.9: Associação de módulos na configuração de um sistema fotovoltaico.

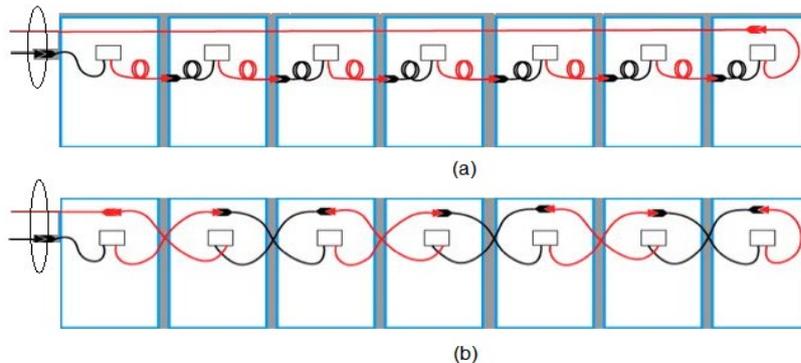


Fonte: (YourHome, 2014, adaptado para o português).

É necessário ressaltar que, na composição de um arranjo fotovoltaico, a forma de conexão dos módulos a partir dos cabos pode influenciar o funcionamento do sistema. O entrelaçamento dos módulos em série, *strings*, pode reproduzir a configuração de um circuito elétrico na forma de espira possibilitando o surgimento de componentes indutivas por todo o circuito do sistema fotovoltaico. Na ocorrência de descargas elétricas próximas ao sistema fotovoltaico, o campo eletromagnético gerado pela descarga elétrica pode induzir uma corrente no sistema e acarretar danos aos módulos e em outros componentes. Para reduzir as influências da componente indutiva, utiliza-se uma configuração de entrelaçamento dos módulos conhecida como *leapfrog* (pulo do sapo, em inglês). Esse modo de conexão reduz a forma de espira do circuito diminuindo sua vulnerabilidade a surtos eletromagnéticos. Outra vantagem desse tipo de entrelaçamento é a economia dos cabos utilizados. Em uma ligação onde não se leva em consideração a configuração *leapfrog*, haverá a necessidade de um cabo maior no final da *string* para retornar ao seu início. Utilizando a configuração *leapfrog*, esse cabo de retorno é suprimido, pois

utiliza-se os próprios cabos usados nos entrelaçamentos para realizar o retorno ao início da *string*. Esse tipo de conexão pode ser observado em uma situação real na Fig. 2.1, no canto inferior direito. Na figura 3.10, pode-se observar as configurações de entrelaçamento entre os módulos.

Figura 3:10: (a) Entrelaçamento convencional de módulos. (b) Entrelaçamento *leapfrog* de módulos.

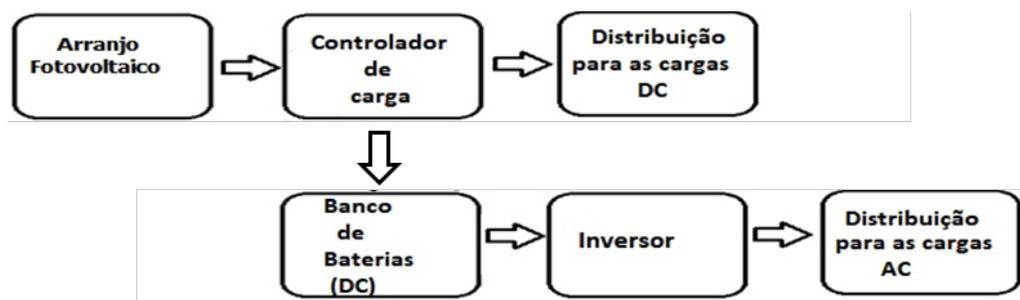


Fonte: (EYZAGUIRRE; SHERWOOD, 2016, adaptado).

De modo geral, um sistema fotovoltaico é constituído de uma unidade geradora de energia, uma unidade de condicionamento de potência, e opcionalmente, uma unidade de armazenamento da energia (PINHO; GALDINO, 2014, p.144). Os tipos de sistema fotovoltaicos podem ser classificados em híbridos, isolados ou autônomos, e conectados à rede elétrica (LOPEZ, 2012, p. 106). A seguir, serão abordados o funcionamento dos sistemas autônomos e conectados à rede, também nomeados como off grid e on grid.

Um sistema autônomo é caracterizado pela sua independência à rede de distribuição elétrica. Dessa forma, torna-se necessário o uso de baterias para armazenamento da energia e uso posterior, quando em situações de pouca ou nenhuma insolação. Em aplicações como em sistemas de irrigação não é necessário o uso de baterias, pois toda água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios (LOPEZ, 2012, p.107). Os componentes para o funcionamento deste tipo de sistema são o conjunto de módulos fotovoltaicos (arranjo), controlador de carga, conjunto de baterias e o inversor, conforme esquema da Figura 3.11.

Figura 3:11: Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo.



Fonte: Autor.

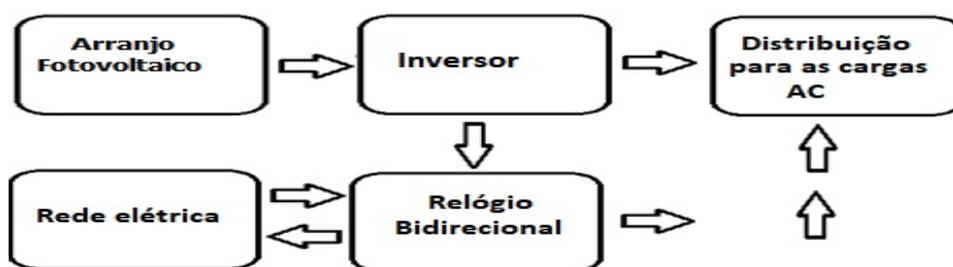
Durante o dia, ao iniciar a geração de energia elétrica, esta é fornecida em termos de corrente contínua aos componentes do sistema. A energia produzida pelos módulos é usada para armazenamento pelo conjunto de baterias e para alimentação da carga. O controlador de carga verifica o nível de carregamento das baterias regulando a carga e descarga do aparelho, impedindo danos ao conjunto, e que corrente elétrica seja injetada nos módulos. Para cargas de corrente contínua, o próprio conjunto de baterias atua fornecendo energia. Entretanto, para cargas de corrente alternada, como os eletrodomésticos, a corrente contínua entregue, deve também ser transformada em corrente alternada pelo inversor. O inversor também pode atuar com a função de seguir o ponto de máxima potência favorecendo a potência fornecida (LOPEZ, 2012, p. 107).

Um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é caracterizado por fornecer energia elétrica em adjacência ao sistema da rede elétrica local. Nesta configuração, quando o sistema fotovoltaico gera mais energia que o necessário, excedendo o consumo de energia para carga, a concessionária local recebe esse excedente e computa como crédito energético. Quando o sistema fotovoltaico não gera o suficiente para o consumo de energia, utiliza-se a energia da rede elétrica que reembolsa o consumo na vigência do crédito de energia produzido. No Brasil, este é o sistema de compensação de energia elétrica regulado pela resolução 482 de 2012 da ANEEL, atualizado pela Resolução 687, de 2015. Trata-se, portanto, de um empréstimo gratuito da energia ativa injetada na rede à distribuidora local, em forma de crédito energético, e posteriormente compensada com o consumo de

energia ativa (ANEEL, 2015). Em outros países, é possível vender a energia ativa excedente à concessionária local.

O funcionamento de um sistema conectado à rede elétrica é diferente de um sistema autônomo em suas unidades de condicionamento de potência e armazenamento. Ao iniciar a geração de energia pelos módulos, em termos de corrente contínua, esta é entregue direto ao inversor e transformada em corrente alternada, de onde pode ser distribuída, por um quadro elétrico, aos aparelhos de consumo. Neste tipo de sistema é necessário que a tensão de saída do inversor seja sincronizada com a tensão da rede (PINHO; GALDINO, 2014, p.216). Para a medição das entradas e saídas de energia da instalação é adicionado um relógio bidirecional, conectado ao sistema fotovoltaico e à rede de energia. Um monitor de geração de energia também pode ser incorporado ao sistema medindo o quanto de energia é gerado em tempo real.

Figura 3:12: Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.



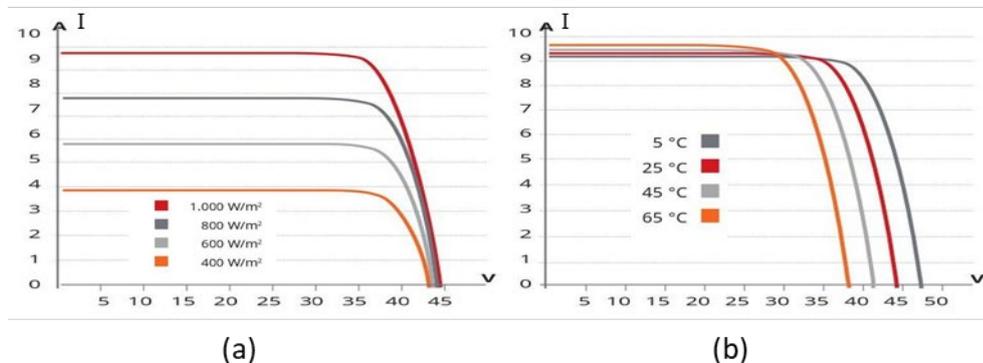
Fonte: Autor.

### 3.4 Fatores que influenciam a geração fotovoltaica de energia

Alguns fatores são determinantes na instalação de um sistema fotovoltaico. A radiação incidente, a temperatura de operação dos módulos e o sombreamento são alguns deles. As grandezas associadas a estes fatores são padronizadas garantindo condições de teste padrão (STC) de forma que células e módulos fotovoltaicos possam ter sua qualidade avaliada e assim serem comercializados. O conhecimento da natureza e influência destes fatores na geração fotovoltaica de energia possibilita o melhor aproveitamento dos recursos e de desempenho para diferentes empreendimentos fotovoltaicos.

O desempenho elétrico das células e módulos solares é influenciado diretamente pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como pela temperatura de operação da célula. A corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ) aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente enquanto a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura (PINHO; GALDINO, 2014). Aumentando a temperatura ambiente e/ou a irradiância incidente, a temperatura da célula aumentará ocasionando uma perda de tensão e de potência gerada, reduzindo sua eficiência (PINHO; GALDINO, 2014). Diminuindo-se a temperatura de operação da célula, a tensão aumentará proporcionando maior eficiência ao dispositivo. A variação da temperatura acarreta pouca alteração (aumenta com o aumento da temperatura) na corrente. A Figura 3.13 mostra a influência da irradiância e da temperatura diretamente na curva I-V de um módulo solar.

Figura 3:13: Efeitos (a) da irradiância e (b) da temperatura na curva I-V de um módulo solar.



Fonte: (Canadian Solar, 2019, adaptado).

### 3.4.1 Irradiância

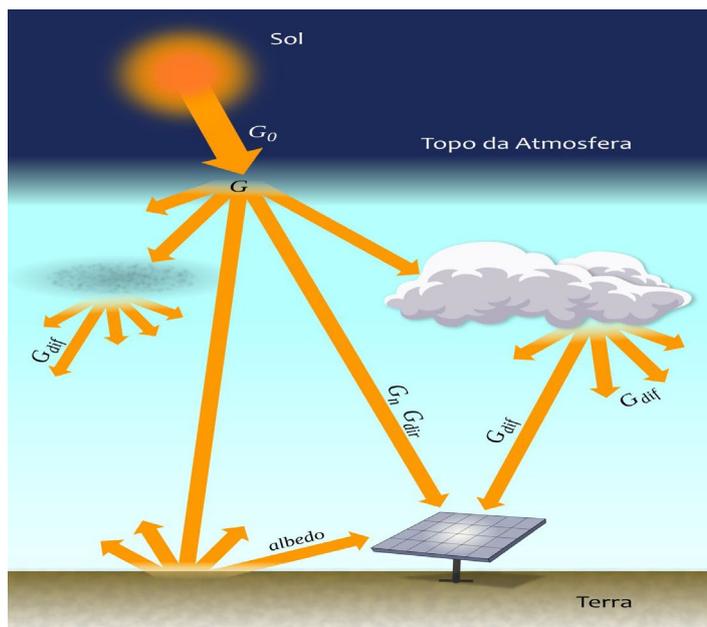
O Sol é a fonte luminosa das células fotovoltaicas e fornece anualmente à atmosfera terrestre,  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, correspondendo a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período (CRESESB, 2014). Como fonte de radiação, seu espectro de emissão pode ser considerado semelhante ao de um corpo negro de temperatura de aproximadamente 5.800 K (PINHO; GALDINO, 2014). As grandezas físicas associadas a radiação solar e utilizadas nos cálculos do potencial de utilização deste recurso são a irradiância e a irradiação solares. A

irradiação solar mede a energia por unidade de área enquanto a irradiância (G) mede a potência incidente por unidade de área. A irradiação leva em conta a potência incidente por área em um certo período de exposição à radiação solar. Desconsiderando, portanto, o fator tempo de exposição e utilizando a irradiância como a grandeza associada à radiação solar, avalia-se a densidade de potência instantânea em uma superfície. A irradiância é a grandeza utilizada no cálculo da eficiência de um dispositivo fotovoltaico, de seu desempenho elétrico e de seu detalhamento técnico.

A irradiância solar que chega até a superfície terrestre varia de acordo com a posição aparente do Sol no céu. Tomando como base a distância média Terra-Sol, ao chegar perpendicularmente no topo da atmosfera, a irradiância apresenta o valor de  $1.367 \text{ W/m}^2$  e é denominada de “constante solar” (PINHO; GALDINO, 2014). Os gases atmosféricos absorvem uma parcela desta energia, fazendo com que a irradiância para superfície terrestre seja de  $1.000 \text{ W/m}^2$ . A inclinação do eixo da Terra de aproximadamente  $23,45^\circ$  em relação ao plano normal da órbita terrestre faz com que a posição aparente do sol mude continuamente enquanto a Terra gira em torno do Sol, mudando assim o ângulo de incidência dos raios solares na superfície e a quantidade de irradiância que pode chegar à superfície terrestre. Essa inclinação e o movimento de translação da Terra definem as estações do ano. Dessa maneira, a irradiância proveniente da altura do Sol no céu dependerá da época do ano, da hora do dia e da latitude local e será máxima no zênite, quando os raios solares encontram a superfície terrestre perpendicularmente. Como referência, a irradiância direta para uma latitude de  $48^\circ$  no zênite é de  $900 \text{ W/m}^2$ .

Ao encontrar a atmosfera terrestre, a luz do sol sofre desvios, decompondo-se em componentes direta que perpassa a atmosfera sem ter sido espalhada e difusa que sofre desvios por toda a atmosfera sendo recebida por todas as direções com exceção da componente direta. Igualmente, a luz do sol sofre desvios na superfície terrestre, dando origem a componente albedo. Usando as mesmas condições anteriores como referência, a irradiância global é de  $1.000 \text{ W/m}^2$ . A Figura 3.14 ilustra o surgimento das componentes a irradiância ao chegar no topo da atmosfera.

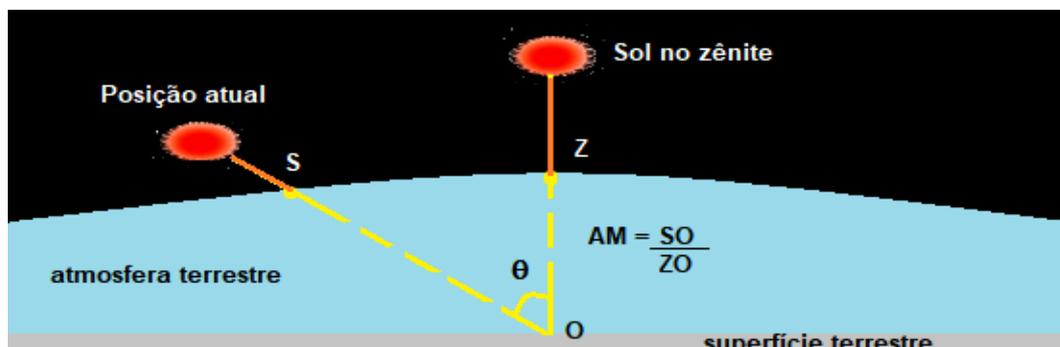
Figura 3:14: Componentes da irradiância solar: difusa ( $G_{dif}$ ), extraterrestre ( $G_0$ ), direta ( $G_{dir}$ ) e albedo.



Fonte: (INPE, 2017).

Além dos desvios da radiação solar ocorridos na atmosfera, uma parte de sua energia é perdida ao longo da trajetória dos raios solares à superfície terrestre devido à massa de ar presente na atmosfera. Para calcular essa perda, define-se o fator Massa de Ar (AM – air mass). Ele mede a razão entre a distância percorrida pelos raios solares na posição atual e no zênite. Uma ilustração do cálculo simplificado do fator AM é apresentada na Figura 3.15.

Figura 3:15: Cálculo do fator Massa de Ar para uma posição arbitrária do sol em relação ao zênite (ponto de referência).

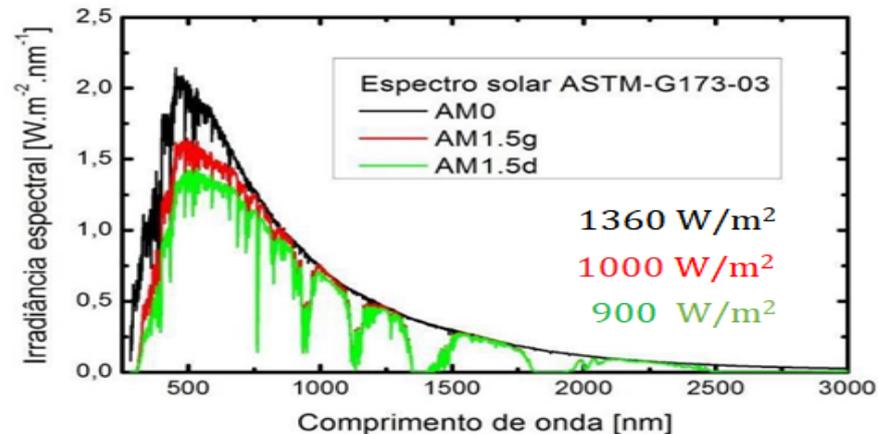


Fonte: Autor.

Assim, a irradiância é medida para espectros de radiação sob condições de massa de ar específicas, de modo que cada valor de AM é utilizado em aplicações

fotovoltaicas diferentes como em propósitos espaciais (AM0) e terrestres (AM1.5). A distribuição espectral sob as condições de AM para algumas aplicações fotovoltaicas é exemplificada na Figura 3.16.

Figura 3:16: Distribuição espectral da irradiância sob condições de AM: AM0 – espectro extraterrestre, AM 1.5g – espectro terrestre global e AM1.5d – espectro terrestre direto.



Fonte: (MICHA, 2019).

O espectro AM 1.5g, utilizado em aplicações terrestres, é o valor base para as condições de teste padrão (STC), de onde as células e os módulos são testados para serem comercializados e utilizados.

### 3.4.2 Temperatura

Como visto, a radiação incidente sobre as células varia ao longo do ano, assim como a temperatura ambiente. A composição destes fatores modifica a temperatura da célula reduzindo ou aumentando sua tensão, mas com pouca alteração na corrente. Para uma variação de 50° C na temperatura de uma célula de silício, sua tensão é reduzida em 16,5%. Em contrapartida, a corrente é aumentada de apenas 2,7%. Desta forma, a eficiência acaba por ser reduzida em 20,5%. Em razão dessa mudança na temperatura, torna-se necessário conhecer as tensões máxima e mínima que os módulos solares podem gerar no decorrer do ano, observando sua influência nas demais unidades que compõem o sistema fotovoltaico, como inversor e controlador de carga. Para efetuar os cálculos do efeito da temperatura, utiliza-se os coeficientes de temperatura que são especificados nos

*datasheets* dos módulos ou em tabelas generalizadas, de acordo com a tecnologia da célula.

Os testes de caracterização elétrica dos dispositivos fotovoltaicos nas STC não representam, na maioria dos casos, situações de operação reais. Para garantir uma proximidade com situações de campo define-se a temperatura operacional nominal de célula representada pela sigla NOCT (*Nominal Operation Cell Temperature*). A NOCT é a temperatura que o módulo alcança no laboratório quando submetido a uma irradiância de 800 W/m<sup>2</sup> em circuito aberto, temperatura ambiente de 20°C com incidência de vento de 1,0 m/s (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3:17: Dados elétricos na condição NOCT e coeficientes de temperatura de um módulo solar de Si policristalino.

<b>DADOS ELÉTRICOS/NOCT*</b>					<b>CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA</b>	
CS6U	315P	320P	325P	330P	Especificação	Dados
Potência nominal máx. (P <sub>máx</sub> )	228 W	232 W	236 W	239 W	Coefficiente de temperatura (P <sub>máx</sub> )	-0,41%/°C
Tensão operacional ideal (V <sub>mp</sub> )	33,4 V	33,6 V	33,7 V	33,9 V	Coefficiente de temperatura (V <sub>oc</sub> )	-0,31%/°C
Corrente operacional ideal (I <sub>mp</sub> )	6,84 A	6,91 A	6,98 A	7,05 A	Coefficiente de temperatura (I <sub>sc</sub> )	0,053%/°C
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	41,5 V	41,6 V	41,8 V	41,9 V	Temperatura operacional nominal da célula	45±2 °C
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	7,44 A	7,50 A	7,57 A	7,66 A		

Fonte: (Canadian Solar, 2019, adaptado).

De acordo com as características de temperatura do módulo apresentadas na Figura 3.17, este alcançará uma temperatura operacional da célula de 45°C e seus coeficientes de temperatura indicam uma redução de 0,41%/°C para potência máxima e de 0,31%/°C de tensão de circuito aberto. Da temperatura nas STC (25°C) à NOCT (45°C) haverá uma variação de 20°C, ocasionando uma perda de 8,2% na potência máxima e 6,2% na tensão de circuito aberto, como pode ser observado ao comparar a potência máxima e tensão de circuito aberto nas figuras 3.8 e 3.16, que fazem parte da mesma folha de dados. Deve-se ressaltar que a irradiância na NOCT é inferior a irradiância nas STC e contribuirá para essa diferença.

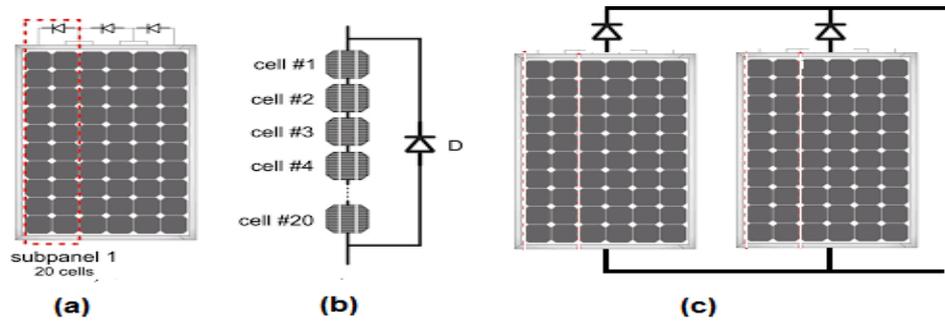
### 3.4.3 Sombreamento

A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica é um dos fatores determinantes na geração de energia. Em um módulo solar, composto por várias células ligadas em série, na ocasião de uma célula receber menos radiação que as demais, sua corrente vai limitar a corrente de toda a sequência de células (PINHO; GALDINO, 2014). Em um sistema fotovoltaico, composto por vários módulos, o mesmo pode ocorrer no eventual sombreamento de um deles. A redução de radiação pode ocorrer de diversas maneiras como por uma folha que cai sobre o módulo ou acúmulo de sujeira na sua superfície, estruturas adjacentes aos sistemas fotovoltaicos que possam sombreá-los, dentre outros. O sombreamento ainda pode ocasionar danos permanentes à célula e comprometer o módulo inteiro devido ao fenômeno de “ponto quente” ou “*hotspot*”. A célula sombreada passa a funcionar como uma carga, recebendo toda a potência gerada pelas outras células e dissipando-a em forma de calor. A intensidade do calor pode acarretar a ruptura do vidro e fusão de polímeros e metais (PINHO; GALDINO, 2014).

Para superar os efeitos do sombreamento, colocam-se diodos de desvio (*bypass*) entre fileiras de células (Figuras 3.18a e 3.18b). Dessa maneira parte da corrente é redirecionada quando uma célula é sombreada limitando a dissipação da potência em forma de calor e os efeitos de pontos quentes, como também a perda de energia. O diodo de desvio é conectado em anti-paralelo com as células. No exemplo de folha de dados da Figura 3.8, pode-se notar a indicação da utilização de três diodos na composição do módulo, um diodo para cada fileira de 24 células.

Em sistemas fotovoltaicos com sequências de módulos conectados em paralelo e/ou unidade de armazenamento, torna-se necessário utilizar diodos de bloqueio como componentes a protegerem a geração de energia e a integridade do sistema contra os efeitos do sombreamento. O diodo de bloqueio é utilizado na saída de cada sequência de módulo impedindo o fluxo de corrente de uma sequência de módulos de tensão maior para uma sequência de tensão menor e descargas noturnas da bateria, onde o módulo se torna uma carga para a bateria (Figura 3.18c).

Figura 3:18: Utilização dos diodos de desvio e diodos de bloqueio em sistemas fotovoltaicos: (a) Diodo de desvio entre fileiras de célula em série e (c) diodos de bloqueio utilizados na saída de módulos em paralelo. Em (b), um esquema do uso do diodo de desvio na situação (a) é apresentado.



Fonte: (Daiuto *et al*, 2016, adaptado).

## **4 Propostas didáticas**

### **4.1 Levantamento de experimentos para demonstração dos conceitos (em nível comercial e experimental)**

Para conhecer os trabalhos existentes que abordam os conceitos da geração fotovoltaica em atividades experimentais e, assim poder avaliar a presença e/ou a falta de recursos didáticos nesta área, uma pesquisa no portal de periódicos da Capes e no site de pesquisa Google Acadêmico (Google Scholar) foi realizada. O interesse central da pesquisa se concentrou em procurar atividades experimentais relacionadas à geração fotovoltaica a partir de células e módulos solares e não no uso desses recursos em sistemas fotovoltaicos. Sendo assim, as palavras de pesquisa “kit didático fotovoltaico”, “kit fotovoltaico”, “kit didático célula solar”, “kit didático energia solar” e “experimentos com células solares”, foram repetidas em ambas as plataformas. Através do site de pesquisa Google Acadêmico, foi possível encontrar uma dissertação de mestrado que propõe, de acordo com seu tema, o “Desenvolvimento de kit didático de geração de energia solar” (PAINES, 2014). Nela, apesar das atividades dependerem exclusivamente do kit proposto, encontram-se atividades experimentais coordenadas por planos de ensino técnico, tais como composição de sua curva I-V, associação elétrica entre células, influência da temperatura e luminosidade no desempenho da célula, entre outros. Os experimentos propostos no referido trabalho se assemelham aos que estamos propondo aqui. A principal diferença em nossa proposta está no conceito de baixo custo e da possibilidade de o usuário construir o próprio kit com elementos de acesso fácil e global.

Outra iniciativa de atividade experimental com células solares pode ser encontrada no periódico Física na Escola cujo tema é “Medição da eficiência de uma célula fotovoltaica: uma proposta de baixo custo para fins didáticos” (COSTA; CHERPINSKI, 2018). Nesta proposta, utiliza-se uma luminária solar de jardim cujas modificações aplicadas permitem traçar a curva I-V do pequeno módulo solar contido na luminária. A qualidade de baixo custo e fácil reprodução do experimento

presentes no referido trabalho são características pretendidas na realização das atividades aqui propostas. É importante ressaltar que nossa proposta vai além do simples experimento proposto no trabalho citado enfatizando outras nuances da geração fotovoltaica. Outro trabalho de interesse, com o cunho de baixo de custo e que se encontra na Revista Brasileira de Ensino de Física, é o intitulado “Células solares “caseiras”” (SILVA et al., 2004). Nela, os autores utilizam o transistor de potência 2N3055 como uma célula solar através da conexão de uma de suas junções pn. Através das simples adaptações aplicadas ao transistor, eles propõem a realização de atividades experimentais de medição da curva I-V, influência de diferentes fontes de luz e sua distância na geração de energia e associação de transistores a fim de aumentar tensão e corrente finais. Apesar de ser uma prática experimental muito interessante e desafiadora, ela é bastante limitada pelo fato das áreas expostas à iluminação serem pequenas, o que faz a corrente elétrica ser de difícil medição (da ordem de  $\mu\text{A}$ ).

Pesquisou-se também kits didáticos comerciais que apresentassem atividades experimentais envolvendo os conteúdos a serem abordados com nossa proposta. Nenhuma empresa brasileira comercializa kits de fabricação própria sobre a geração fotovoltaica por células ou módulos. Apenas encontramos kits de experimentos que versam sobre os sistemas fotovoltaicos tais como: bancadas didáticas pela empresa Sonnen Energia e Kit didático para ensino de sistemas conectados à rede pela empresa Astral Científica. A empresa alemã PHYWE, representada pela Nova Didacta, no Brasil, apresenta o produto Sistema de Treinamento em Energias Renováveis Solar/Hidro/Eólica. kit contém 26 experimentos, sendo onze experimentos na área de energia solar, dos quais seis têm a mesma temática da nossa proposta. Os experimentos incluem: influência do nível da iluminação na corrente e tensão da célula, tensão e corrente de conexão em série e em paralelo das células, a célula solar como fonte de energia para dispositivo luminoso (LED), armazenamento de energia elétrica da célula solar em pilhas recarregáveis e curvas características da célula solar. A cotação deste kit didático é de R\$ 28.766. Pode-se fazer uma estimativa do valor do kit apenas para a parte de energia solar pela porcentagem da quantidade destes experimentos. Estes experimentos constituem 42,3% do kit, o que permite calcular o valor de R\$ 12.168.

Uma estimativa mais justa para comparação com a nossa proposta seria de R\$ 6.638, baseando-se apenas nas atividades experimentais semelhantes a que abordaremos.

Portanto, as atividades apresentadas, em termos de trabalhos acadêmicos e produtos comerciais, compõem o levantamento bibliográfico realizado das práticas experimentais na área de geração fotovoltaica ofertadas no Brasil. Além de servir de base para este trabalho, observamos naquelas as deficiências e limites que podem ser melhorados por nossa proposta.

## **4.2 Atividades Experimentais**

A inserção de atividades experimentais no ensino técnico na área de energia solar fotovoltaica se torna evidente na escolha da metodologia de ensino no exemplo de curso apresentado anteriormente (Anexo E), onde aulas práticas dentro e fora de laboratórios são constantemente utilizadas. Logo, a importância dessas atividades e de um aparato que permita sua instrumentalização dentro da modalidade de ensino visada é manifestada também por essa afinidade pedagógica.

O processo de geração de energia, os fatores que influenciam a eficiência de uma célula, módulo e sistema fotovoltaico, o dimensionamento de tensão e corrente de acordo com as associações das células e a parametrização elétrica que culmina no detalhamento técnico desses dispositivos abstraem conceitos que são mais bem abordados nas condições de atividades experimentais. Neste sentido, a construção e o desenvolvimento de um aparato didático que exponha os fenômenos físicos de interesse e permita uma manipulação instrumental pode se apresentar como uma ferramenta poderosa no ensino/aprendizagem desses (e de outros) conceitos de física e oferecer um caminho para o desenvolvimento do conhecimento abordado. Sobre a atuação da atividade experimental na formação do aluno, Séré, Coelho e Nunes (2003) ressaltam: “graças às atividades experimentais, o aluno é incitado a não permanecer no mundo dos conceitos e no mundo das “linguagens”, tendo a oportunidade de relacionar esses dois mundos com o mundo empírico”. Este mundo empírico é representado pelo aparato construído para a realização de atividades de

experimentação, onde teoria e conceitos podem ser explorados através de sua instrumentação. Dessa maneira, as atividades experimentais se apresentam também como procedimento, um meio a auxiliar o professor no processo de ensino permitindo ao aluno obter tanto as informações e as relações da realidade estabelecida como o lugar onde os significados podem ser reconstruídos.

#### **4.2.1 Desenvolvimento de protótipo de kit de geração fotovoltaica**

Na realização de atividades experimentais, a utilização de alguns kits didáticos acaba por se mostrar totalmente misteriosa, pois os mesmos se apresentam como “caixas pretas”, isolando uma grande parcela da realidade que a compõe a fim de objetivar outra que são apenas os dados a serem obtidos. Não obstante, apresentam detalhes técnicos, ajustes e procedimentos, realizados somente pelo professor, que podem não ser tão evidentes a todos os alunos recaindo na qualidade de “caixa preta”. Como apresentado anteriormente, alguns desses kits também apresentam valores muito altos para sua aquisição e composição dos laboratórios, tornando inviável uma manipulação mais individualizada do kit e das atividades experimentais, recaindo nas mãos do professor a instrumentalização restando apenas ao aluno a observação. Para superar esses e outros problemas, propomos, neste trabalho, um protótipo para as atividades experimentais que cumpra os seguintes requisitos:

- Garantir uma interação aluno-kit de forma a não se mostrar uma “caixa preta”, permitindo a visualização completa de seus componentes e constituintes;
- Possibilitar uma utilização individualizada, onde cada aluno possa realizar as atividades em seu próprio espaço, ou em pequenos grupos;
- Atingir a qualidade de baixo custo e fácil acesso aos materiais de reposição;
- Possibilitar atividades experimentais que trabalham os conceitos referentes aos conteúdos visados em um curso técnico em energia solar fotovoltaica e em consonância com sua metodologia.

#### **4.2.1.1 Placas de Circuito Impresso e Componentes Utilizados**

As placas de circuito impresso (PCI) são materiais capazes de acomodar componentes eletrônicos e permitir seus contatos e conexões elétricas. A PCI é constituída por uma placa onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre, sendo a própria placa o material isolante (Melo; Rios; Gutierrez, p. 114, 2001). A utilização de placas de circuito impresso na elaboração do protótipo permite diferentes possibilidades de configuração dos circuitos (trilhas) a serem empregados sob a lâmina de cobre. Neste sentido, apresenta também as vantagens de simplificação e adaptação dos circuitos de acordo com o propósito destes.

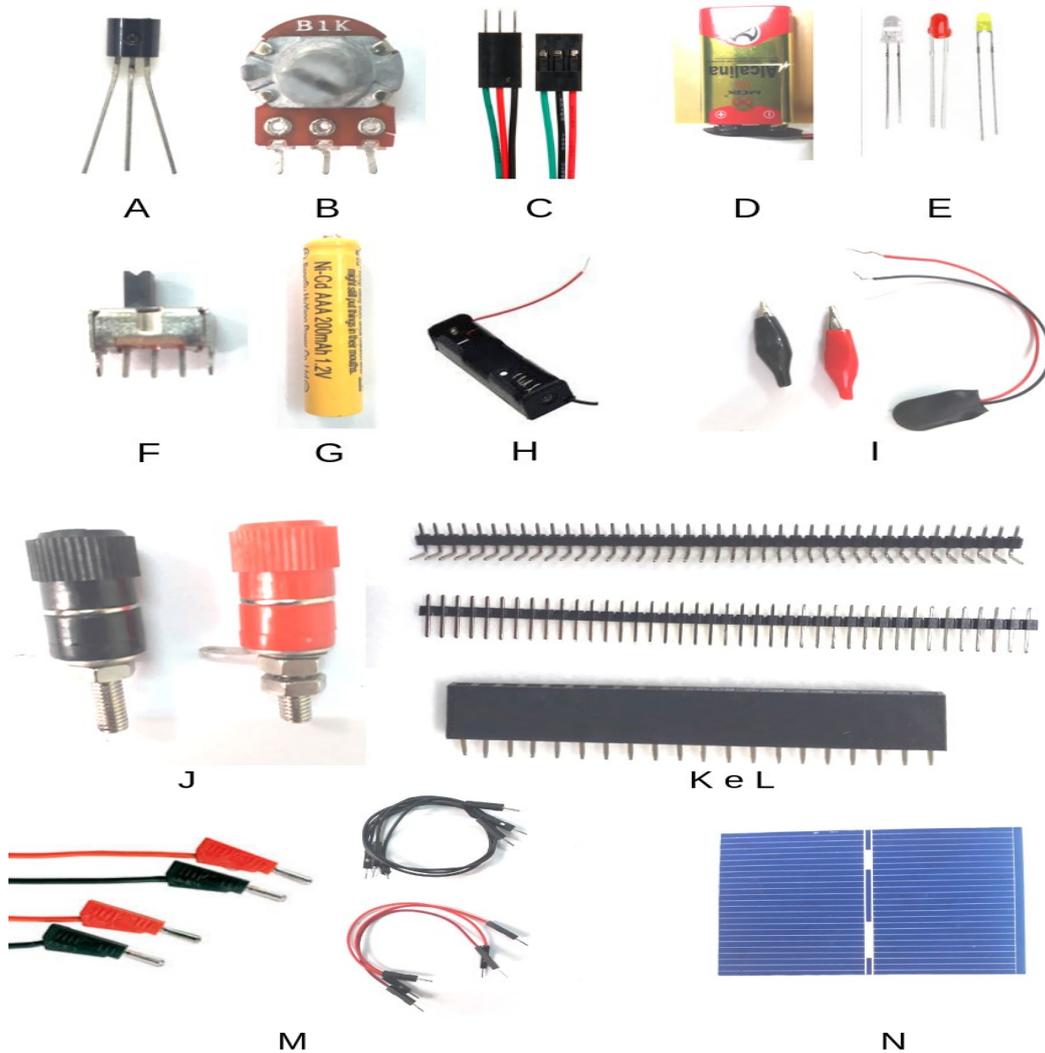
O material comumente utilizado em aplicações artesanais é a chapa de fenolite, fabricada através de aglomerados de papel e resina fenólica. Suas vantagens são o baixo custo e fácil perfuração para acomodação dos componentes eletrônicos. Entretanto, sua principal desvantagem é a absorção de água em ambientes úmidos o que pode comprometer as características isolantes e empenar a placa. Outro material utilizado na fabricação de PCI é a fibra de vidro, material mais resistente que a chapa de fenolite (Melo; Rios; Gutierrez, p.114, 2001). Apesar de superar os problemas causados pela umidade na placa de fenolite, a placa de fibra de vidro é mais cara e devido sua resistência necessita de materiais especiais para efetuarem as perfurações necessárias para acomodarem os componentes utilizados. Para desenvolver o kit optou-se pela placa de fenolite devido seu baixo custo, fácil perfuração e disponibilidade de mercado. A utilização de placas de circuito impresso na elaboração do protótipo permite diferentes possibilidades de construção do circuito a ser empregado.

Após a justificativa da escolha da placa, apresentamos, na lista abaixo, os componentes a serem utilizados em conjunto para a realização das atividades experimentais. Eles ficam mais facilmente identificados nas imagens das Figura 4.1.

- A) Sensor de temperatura LM35
- B) Cabo de três vias macho-fêmea (arduino)
- C) Potenciômetro de 1k $\Omega$
- D) Bateria 9V

- E) LEDs vermelhos alto brilho e difusos vermelho e amarelo
- F) 3 mini-chaves para PCI de três terminais (marca SWITCH)
- G) 2 pilhas recarregáveis aa 1000 mAh
- H) 2 caixas plásticas para pilha aa
- I) Conectores garra e clip para bateria
- J) 4 bornes vermelhos e 4 bornes pretos (3mm)
- K) Conectores barra de pinos fêmea 1x40
- L) Conectores barra de pinos estampado 1x40x14,6 90°
- M) Cabos
- N) 4 Células solares de Si dimensões 5,2 x 3,9 cm

Figura 4:1: Componentes usados na fabricação dos módulos.



Fonte: Autor.

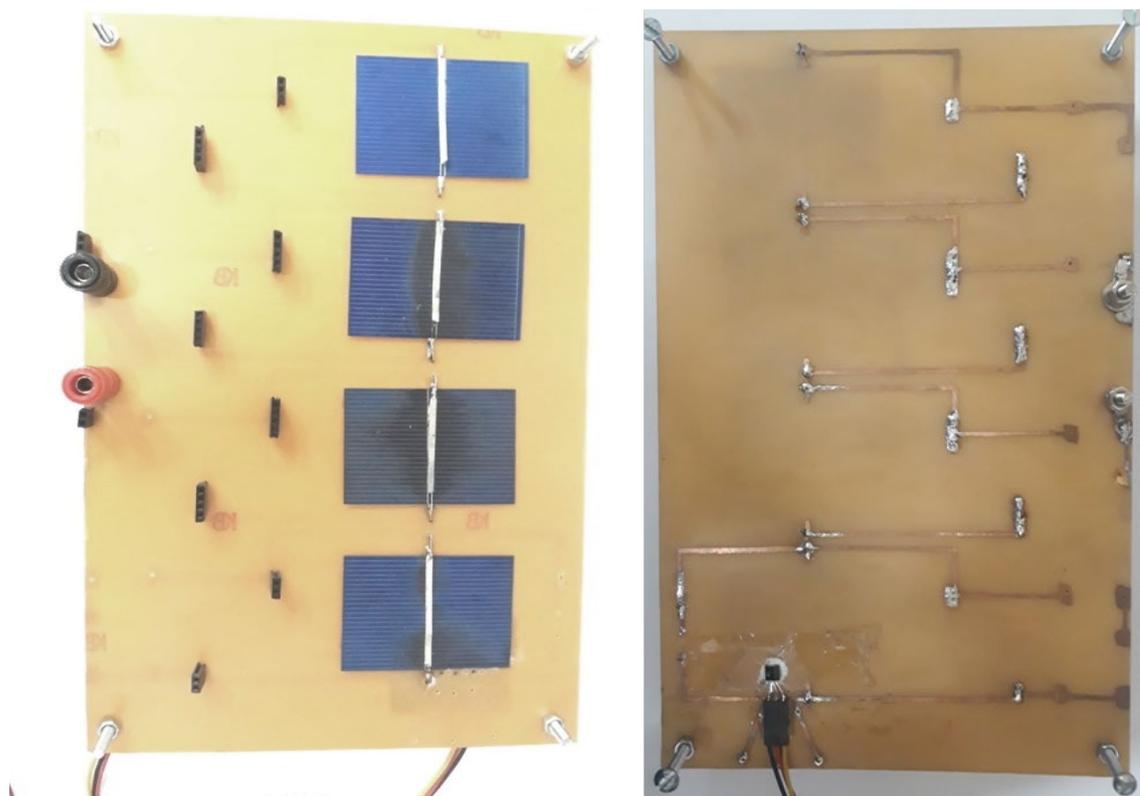
Os itens A a I são específicos, mas podem ser encontrados facilmente em lojas de comércio de produtos eletrônicos. Os itens J a M são genéricos e podem ser substituídos por outros similares que atendam a mesma função. O item N deve ter a especificação exata. As células solares usadas neste trabalho foram adquiridas no seguinte fornecedor: Mercado Livre com os seguintes títulos de venda: Kit 10x Mini Célula Energia Solar Fotovoltaico Placa 52x39mm, Kit 30x Mini Celula Solar Fotovoltaico Placa 52x39mm e Kit 50x Mini Celula Solar Fotovoltaico Placa 52x39mm. Mas poderiam ser obtidas do fornecedor AliExpress com o seguinte título de venda: 50 pcs x Painel Células Do Painel Solar DIY Carregador de Energia Solar de Silício Policristalino Solar Bord 52\*39mm 0.5 V 0.33 W.

A confecção do aparato didático se deu pela acomodação dos componentes em placas de circuito impresso e a soldagem de seus respectivos componentes. O kit foi dividido em 4 módulos, cada um com uma função representativa: módulo fotovoltaico, carga, dispositivos luminosos, armazenamento.

#### **4.2.1.2 Módulos Componentes do Kit**

O módulo fotovoltaico é apresentado na Figura 4.2 sendo composto por uma placa de circuito impresso de dimensões 25x15 cm, pelas 4 células, 12 conectores barra de dois pinos fêmea, 8 conectores barra de pinos estampado 1 x 40,0 x 14,6 de 90° (este conector servirá de ligação entre os terminais da célula e as trilhas de cobre), o sensor de temperatura LM35 e o cabo de três vias acoplado aos terminais do sensor de temperatura. Utilizou-se as cores amarelo, vermelho e preto para o cabo de três vias correspondendo aos terminais de entrada de tensão, saída para leitura e comum, respectivamente. Acoplaram-se 2 bornes para as conexões de aparelhos de medição e dos demais módulos. No módulo fotovoltaico, é possível realizar a associação das 4 células em série, paralelo ou mista, verificação da temperatura de uma das células e visualização dos efeitos de sombreamento.

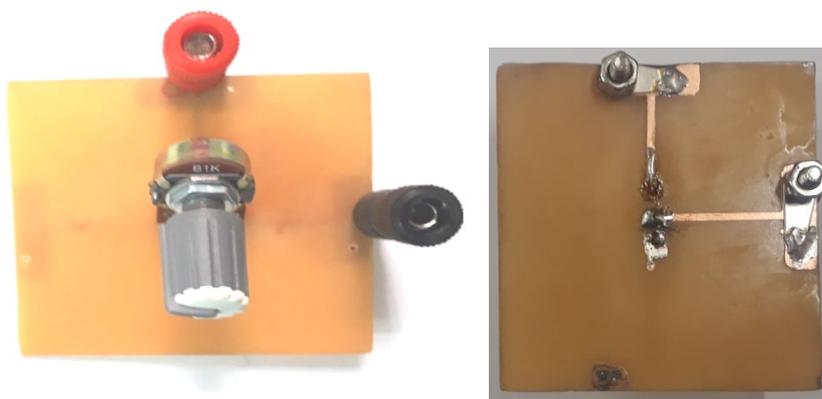
Figura 4:2: Módulo Fotovoltaico.



Fonte: Autor

O módulo de carga, apresentado na Figura 4.3, é constituído pelo potenciômetro e pelos bornes para as conexões dos aparelhos de medidas e demais módulos. Ele servirá como carga variável para as medidas de tensão e corrente.

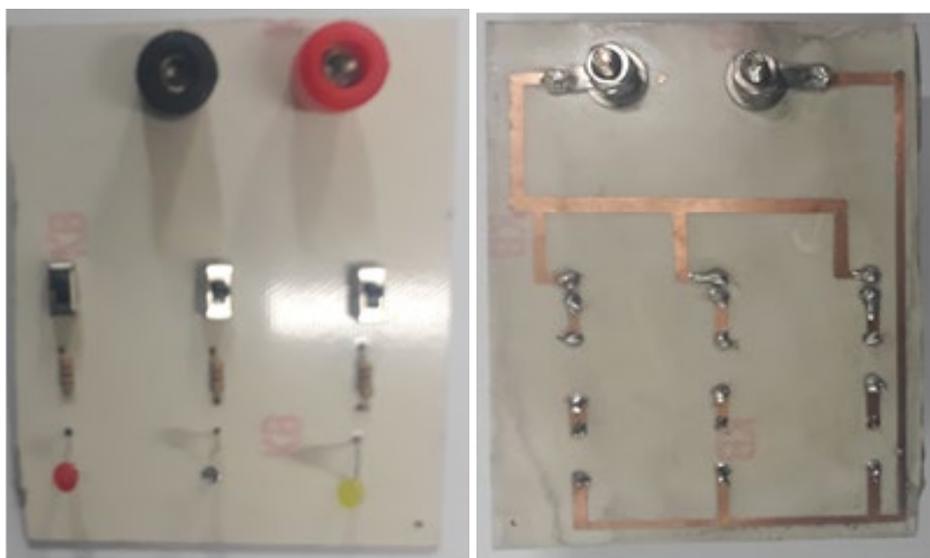
Figura 4:3: Módulo de Carga.



Fonte: Autor

O módulo de dispositivos luminosos (Figura 4.4) contém os três LEDs ligados em paralelo chaveados pelas três chaves e os bornes para as conexões com os outros módulos. Ele servirá como uma aplicação ilustrativa da energia solar fotovoltaica no acionamento de dispositivos luminosos.

Figura 4:4: Módulo de Dispositivos Luminosos.



Fonte: Autor.

O módulo de armazenamento contém as duas pilhas recarregáveis, 4 conectores barra de dois pinos fêmea, 1 LED vermelho, 3 resistores de 10 ohms (uma para cada pilha e um para o LED) e dois bornes. Este módulo servirá de ilustração para o armazenamento da energia solar fotovoltaica.

Figura 4:5: Módulo de Armazenamento.



Fonte: Autor.

Para realização das atividades são necessários módulos desenvolvidos para o kit, instrumentos de medida, tais como amperímetro e voltímetro e a bateria de 9V para alimentar o sensor de temperatura. Para alimentar os terminais do sensor de temperatura com a bateria, foram soldados nos terminais do clip para bateria os conectores tipo garra jacaré.

## **4.2.2 Propostas de atividades experimentais**

As atividades experimentais são apresentadas em termos gerais nas próximas subseções. As propostas detalhadas e os roteiros sugeridos se encontram nos anexos deste trabalho.

### **4.2.2.1 – Atividade 1: Conhecendo o fenômeno de conversão fotovoltaica**

- Descrição geral

A atividade visa proporcionar a observação do fenômeno de conversão fotovoltaica, ou seja, conversão da energia luminosa em energia elétrica, evidenciando a célula solar como a tecnologia que permite o processo. O experimento consiste em acionar dispositivos luminosos (LEDs), carregar duas pilhas recarregáveis com a energia gerada e utilizar as pilhas para acionar os dispositivos luminosos. Sendo assim, este experimento aborda as duas formas básicas de utilização da energia fotovoltaica através de seu uso imediato ou de seu armazenamento. A dinâmica proposta neste experimento consiste em observar qualitativamente como o brilho do LED varia em função de diversos parâmetros da geração fotovoltaica, tais como o sombreamento, a distância entre fonte luminosa e células e a orientação espacial em relação à fonte. Em experimentos posteriores, diversas destas práticas voltam a ser realizadas, porém com um caráter mais quantitativo.

Essa atividade se enquadra na unidade curricular Eletricidade Básica Aplicada a Sistemas Fotovoltaicos do módulo básico e nas unidades Tecnologia Solar Fotovoltaica: Módulos, Arranjo, células e Sistemas Fotovoltaicos: Isolados, Conectados à Rede, Híbridos, Bombeamento de Água do módulo específico dos Itinerários Formativos dos perfis referidos. Os conteúdos programáticos considerados com as atividades são:

- Conceitos básicos sobre eletrostática e eletrodinâmica: circuitos elétricos
- Manuseio de instrumentos de medição das grandezas elétricas
- Conceitos básicos relacionados ao efeito fotovoltaico
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos isolados
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede
- Fatores que afetam a eficiência de um módulo fotovoltaico
- Efeitos das condições ambientes e locais (temperatura, sombreamento, etc.) sobre módulos e arranjos fotovoltaicos

- Material usado

Neste experimento são utilizados o Módulo Fotovoltaico, Módulo de Dispositivos Luminosos e Módulo de Armazenamento. Para conexão entre os módulos, utilizam-se cabos banana 3 mm ou garra.

- Sugestões ao professor

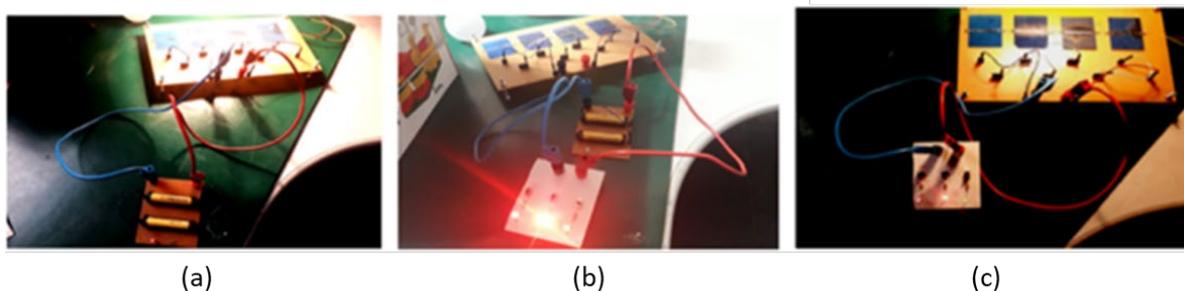
Esta atividade surge como um primeiro contato do aluno com o fenômeno de conversão fotovoltaica e com a tecnologia a ser explorada durante o curso. Nesta atividade, o uso da energia fotovoltaica para alimentar os LEDs garante uma visualização imediata de todos os fatores que influenciam na geração de energia. Sombrear as células parcial ou totalmente, cobrindo sua superfície com algum material extenso influenciará no brilho do LED e mostrará ao aluno a relação qualitativa direta entre a potência luminosa e a geração fotovoltaica. Para demonstrar uma fonte de sombreamento bem comum em casos práticos, o professor

pode simular a sujeira dos módulos espalhando alguma fonte de sujeira (fácil de ser removida posteriormente) nas células. Mudar a distância da fonte de luz ao conjunto de células também alterará a potência luminosa incidente influenciando no brilho do LED. Outra relação que pode ser explorada é orientação espacial das células em relação à fonte luminosa. Ao alterar o ângulo de incidência da luz ao girar o módulo com as células, a potência luminosa absorvida também é alterada. Portanto, de modo qualitativo pode-se apresentar ao aluno os fatores externos que influenciam na eficiência das células, tal como irradiância que atinge as células, assim como as condições desfavoráveis à geração fotovoltaica, tais como sombreamento e sujeira. Estes passos estão descritos nas atividades do Anexo A, cabendo ao professor escolher como utilizá-las e orientá-las.

- Exemplo de utilização e resultados

Na Figura 4.6, encontram-se algumas formas de utilizar os Módulos e seus resultados na reprodução das principais atividades destinadas a Atividade 1 e orientadas pelo roteiro.

Figura 4:6: (a) Utilização dos Módulos Fotovoltaico e Armazenamento. (b) Utilização dos Módulos Armazenamento e de Dispositivos Luminosos. (c) Utilização dos Módulos Fotovoltaico e de Dispositivos Luminosos.



Fonte: Autor.

#### 4.2.2.2 – Atividade 2: Medindo o desempenho elétrico de uma célula solar

- Descrição geral

Nesta atividade, os parâmetros elétricos de uma célula solar serão medidos e seu desempenho calculado. A atividade se constitui em obter dados de tensão e corrente de uma célula solar a partir da variação da resistência em uma carga resistiva, traçar sua curva I-V e extrair as informações relevantes para análise do seu desempenho. Assim, é possível estudar os principais parâmetros que a caracterizam e que servem de referência ao seu detalhamento técnico (*datasheet*). Igualmente, pela curva I-V, torna-se conhecido o desempenho ou eficiência da célula como conversor de energia, vinculada a resistência apresentada pela carga a ser alimentada.

Essa atividade se enquadra na unidade curricular Tecnologia Solar Fotovoltaica: Módulos, Arranjo, Células do módulo específico dos Itinerários Formativos dos perfis referidos. O conteúdo programático considerado com as atividades é:

- Interpretação da curva I-V de uma célula fotovoltaica

- Material usado

Neste experimento, são utilizados o Módulo Fotovoltaico, Módulo de Carga e fonte de luz incandescente. Para as conexões entre os módulos, sugere-se o uso de cabos de conexão banana ou garra.

- Sugestões ao professor

A curva I-V de uma célula solar é a sua identidade. Para extrair as informações relevantes que a caracterizam como produto e que vão nos *datasheets* de fabricantes, por exemplo, é necessário medir os pontos de corrente e tensão em funcionamento, ou seja, quando alimenta uma carga. Para isso, deve-se utilizar o

módulo fotovoltaico e o módulo de carga, orientando os alunos na escolha dos pontos de tensão e corrente, pois a sensibilidade do potenciômetro próximo à  $I_{SC}$  é bastante grande. É necessário também, orientar a uma tiragem rápida dos dados, dado o aquecimento da célula e sua alteração na  $V_{OC}$ , caso a fonte seja incandescente. Este experimento pode ser acompanhado pela análise de *datasheets* de módulos de diferentes empresas fabricantes ou utilizado em uma aula com esse objetivo. Além disso, pode-se aproveitar para realizar uma discussão sobre os diversos tipos de tecnologia de células solares, diferenciando-os pelos seus principais parâmetros elétricos.

- Exemplo de utilização e resultados

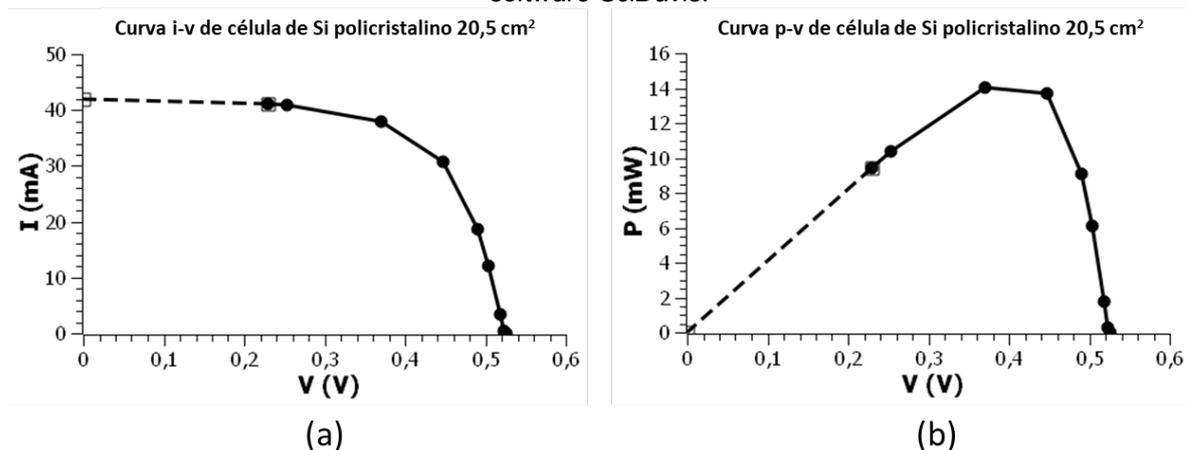
Na Tabela 4.1, encontram-se os principais resultados obtidos para a Atividade 2, orientada pelo roteiro proposto no Anexo B. Os dados obtidos permitem construir as curvas I-V e P-V semelhantes às encontradas em modelos típicos, como na Figura 4.7.

Tabela 4-1: Dados obtidos de corrente, tensão e potência para construção das curvas I-V e P-V.

<b>Ponto medido</b>	<b>Corrente (mA)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Potência (mW)</b>
Curto circuito (extrapolado)	42,0	0,000	0,00
1	41,1	0,229	9,41
2	40,9	0,253	10,34
3	37,9	0,370	14,02
4	30,7	0,447	13,72
5	18,6	0,490	9,11
6	12,1	0,504	6,09
7	3,4	0,518	1,76
8	0,5	0,523	0,26
Circuito aberto	0,0	0,526	0,00

Fonte: Autor.

Figura 4:7: (a) Curva I-V e (b) curva P-V construída com os dados da tabela 4-1 e com o uso do software SciDavis.



Fonte: Autor.

Com as curvas I-V e P-V, é possível obter os parâmetros elétricos da célula solar e discutir sobre sua eficiência, pontos de operação, etc. Recomenda-se iniciar a tomada de dados a partir do curto-circuito, realizado com a leitura direta da corrente com um amperímetro. Isso se deve ao fato de a célula ir esquentando ao longo da medida e, com isso, os parâmetros elétricos irem sendo alteradas. Como o impacto maior da temperatura é na tensão, deixando a  $V_{OC}$  por último, esta é menos afetada, já que a célula tende a uma temperatura de equilíbrio após um tempo. Outro detalhe é o fato de o amperímetro ter sua resistência interna e, com isso, haverá uma tensão associada. Por este motivo, o ponto  $(0, I_{SC})$  é praticamente impossível de ser obtido com uma carga resistiva, e costuma ser extrapolado, como na Figura 4.7.

### 4.2.2.3 – Atividade 3: Compreendendo a associação elétrica de células em série e em paralelo

- Descrição geral

Nesta atividade, o aluno conhecerá a associação de células solares e os efeitos na tensão e corrente elétricas do conjunto associado. A atividade consiste em associar as células solares em série e em paralelo através das conexões

apropriadas de seus terminais, garantindo de forma prática e rápida a visualização e verificação dos efeitos.

Essa atividade se enquadra na unidade curricular Tecnologia Solar Fotovoltaica: Módulos, Arranjo, Células do módulo específico dos Itinerários Formativos dos perfis referidos. O conteúdo programático considerado com as atividades é:

- Processo de construção de um módulo fotovoltaico

- Material usado

Neste experimento, serão utilizados o Módulo Fotovoltaico e fonte de luz incandescente, sugere-se o uso de cabos banana ou garra e fios de conexão.

- Sugestões ao professor

A técnica de associação de células é o que permite construir os módulos fotovoltaicos, pois uma célula solar fornece um valor de tensão muito baixo. Neste sentido, este é o momento que o aluno compreende as conexões que são realizadas nos módulos fotovoltaicos comerciais e pode associar livremente as células, construindo seu próprio módulo. Com os testes realizados, os alunos compreenderão os parâmetros elétricos dos módulos comercializados. Desse modo, sugere-se ao professor que associe as medidas realizadas para as células individualmente com aquelas realizadas neste experimento, enfatizando a especificidade da conexão, ou seja, da corrente igual e tensão maior na associação em série e da tensão igual e da corrente maior na associação em paralelo. Com as medidas de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito tomadas para cada associação e quantidade de células associadas, o professor pode orientar os alunos a construir a curva I-V composta, seguindo o modelo de curva I-V obtido na atividade anterior, onde procura-se obter a curva I-V de uma única célula.

Adicionalmente, é possível discutir diferentes formas de ligação em série entre as células, que podem ser replicadas na montagem das séries fotovoltaicas entre os módulos em um sistema fotovoltaico real. Como o Módulo Fotovoltaico

permite ao aluno escolher as conexões entre as células, o professor pode explorar conexões mais econômicas, tal como a *leapfrog*. Esta forma de conexão traz vantagens, tais como a menor necessidade de cabos, a redução das perdas por efeito Joule nos cabos, redução da componente indutiva no sistema (o que evita problemas de sobretensão com descargas elétricas), dentre outros, conforme discutido no capítulo 3.

- Exemplo de utilização e resultados

Nas Tabelas 4.2 e 4.3, encontram-se os principais resultados obtidos para a Atividade 3, orientada pelo roteiro proposto no Anexo C.

Tabela 4-2: Dados de tensão e corrente para uma associação de células em série.

Parâmetro	Configuração das células Ci			
	C1	C1 + C2	C1 + C2 + C3	C1 + C2 + C3 + C4
$V_{OC}$ (V)	0,510	1,06	1,55	2,11
$I_{SC}$ (mA)	43,0	41,3	40,4	42,3

Fonte: Autor.

Tabela 4-3: Dados de tensão e corrente para uma associação em paralelo das células.

Parâmetro	Configuração das células Ci			
	C1	C1 + C2	C1 + C2 + C3	C1 + C2 + C3 + C4
$V_{OC}$ (V)	0,521	0,527	0,517	0,520
$I_{SC}$ (mA)	45,6	103,6	150,9	183,0

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos apresentam-se coerentes com a esperada soma de tensão na associação em série e de corrente na associação em paralelo de células. As pequenas diferenças de tensão e corrente encontradas na soma de célula para célula podem ser explicadas pelas diferenças de tensão e corrente que cada célula produz individualmente, devido a qualidade de fabricação de cada célula. Outro fator importante para essas diferenças é o espaçamento entre as células no módulo fotovoltaico ocasionando menor captação de luz em algumas delas.

#### **4.2.2.4 – Atividade 4: Investigando a influência da irradiância, temperatura e sombreamento**

- **Descrição Geral**

Nesta atividade, visa-se conhecer os fatores que influenciam na potência fornecida pela célula solar e de um modo geral na conversão fotovoltaica. A atividade consiste em verificar os efeitos da irradiância, distância e direção da radiação, e da temperatura, aquecimento da célula, na geração de corrente e tensão elétricas, especificamente na  $I_{SC}$  e na  $V_{OC}$ . Com o modelo de curva I-V obtido na atividade anterior, pode-se usar os valores de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  obtidos, de acordo com a variação da temperatura e irradiância, para esboçar curvas I-V correspondentes e verificar as disparidades.

Essa atividade se enquadra na unidade curricular Tecnologia Solar Fotovoltaica: Módulos, Arranjo, Células do módulo específico dos Itinerários Formativos dos perfis referidos. Os conteúdos programáticos considerados com as atividades são:

- Fatores que afetam a eficiência de um módulo fotovoltaico.
- Efeitos das condições ambientes e locais (temperatura, sombreamento, etc...) sobre módulos e arranjos fotovoltaicos.
- **Material usado**

Neste experimento, serão utilizados o Módulo Fotovoltaico e uma fonte de luz, de preferência uma lâmpada incandescente.

- **Sugestões ao professor**

Os efeitos dos fatores estudados nessa atividade são elementos determinantes na viabilidade técnica de uma instalação fotovoltaica. Neste sentido, o professor pode retornar a utilizar o Módulo de Dispositivos Luminosos permitindo ao aluno realizar as mesmas atividades propostas e verificar a ocorrência dos fatores estudados na alimentação de uma carga, na aplicação imediata da energia

fotovoltaica e os prejuízos causados pelos fatores estudados na geração. O estudo dos efeitos da temperatura, através das atividades propostas, pode ser acompanhado pela análise das características da temperatura nos *datasheets* de empresas diferentes realizando os cálculos da influência da temperatura na tensão, corrente e potência utilizando os coeficientes de temperatura. O professor deve orientar o aluno na alimentação correta do sensor de temperatura e na leitura dos dados.

- Exemplo de utilização e resultados

Os principais resultados obtidos na Atividade 4, orientada pelo roteiro proposto no Anexo D, podem ser observados nas Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.

Tabela 4-4: Dados de corrente e tensão para distâncias variadas da fonte de luz em relação as células para verificação da influência da irradiância na produção de energia.

<b>Distância (cm)</b>	<b>I<sub>SC</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>OC</sub> (V)</b>
24 cm	29,0	0,510
12 cm	119,4	0,562
6 cm	440,0	0,588

Fonte: Autor.

Tabela 4-5: Dados obtidos de temperatura e tensão para a verificação da influência da temperatura na produção de energia.

<b>Tempo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>V<sub>OC</sub> (V)</b>
0	Ambiente: 21,5	0,549
30 segundos	22,5	0,542
1 minuto	23,2	0,541
2 minutos	24,4	0,537

Fonte: Autor.

Tabela 4-6: Dados de corrente para uma série de células solares com sombreamento.

<b>Parte sombreada</b>	<b>I<sub>SC</sub> (mA)</b>
Sem sombreamento	44,9
Metade da célula coberta	25,2
Célula completamente coberta	4,6

Fonte: Autor.

Tabela 4-7: Dados de corrente para células solares em paralelo com sombreamento.

<b>Parte sombreada</b>	<b>I<sub>SC</sub> (mA)</b>
Sem sombreamento	182
Metade da célula coberta	167
Célula completamente coberta	147,3

Fonte: Autor.

Através dos dados obtidos nas tabelas acima, é possível perceber e discutir as influências dos fatores irradiância, temperatura e sombreamento atuando na geração fotovoltaica. Para uma maior irradiância (distâncias menores da fonte de luz às células), ambas tensão e corrente aumentam (Tabela 4.4). Entretanto, a corrente aumenta em proporções muito maiores que a tensão, como esperado. Ainda, é possível discutir quantitativamente a relação linear entre  $I_{SC}$  e a irradiância. Como a potência de uma fonte luminosa cai com o inverso do quadrado da distância, é esperado que a corrente quadruplique com a redução da distância pela metade. A partir dos dados apresentados na Tabela 4-4, é possível perceber essa tendência. Ao aquecer a célula com a própria fonte luminosa, medindo sua temperatura para diferentes instantes de tempo, é possível perceber a diminuição da tensão e, conseqüentemente, da geração de energia (Tabela 4.5). É possível calcular quantitativamente os coeficientes térmicos do material utilizado nas células. Porém, para isso, é importante que se meça os parâmetros elétricos num intervalo grande de variação de temperatura. No caso dos dados apresentados na Tabela 4-5, que não apresenta tal variação, obtemos o valor de  $-0,7\%/^{\circ}\text{C}$ , que se encontra na ordem de grandeza do coeficiente da  $V_{OC}$  para Si. Nas Tabelas 4.6 e 4.7, pode-se perceber a influência de condições variadas de sombreamento nas células, tanto em série como em paralelo, ocasionando a diminuição na corrente gerada.

## 5 Considerações finais e Perspectivas

Neste trabalho, apresentamos atividades experimentais em energia solar fotovoltaica assim como um aparato para sua realização, que permite a compreensão detalhada do fenômeno de geração fotovoltaica.

Com relação ao aparato apresentado, o kit experimental de baixo custo “Descobrimos a Energia Solar”, o uso de placas de circuito impresso permite uma visualização ampla de todos os componentes e das trilhas de cobre como caminho da corrente elétrica por entre os componentes, dando a qualidade de “caixa aberta” ao kit, diferente do encontrado em kits referenciados. Todas as medidas realizadas nos experimentos são obtidas de forma analógica, através de multímetros, que são aparelhos elétricos na qual sua utilização é aprendida na parte introdutória dos cursos. O tamanho dos módulos, e do kit por inteiro, permite sua utilização de forma versátil em ambientes dentro e fora de sala de aula, de igual modo sua movimentação para outros ambientes. A placa de fenolite e os componentes utilizados para a realização das mesmas atividades experimentais apresentam valores muito mais baixos do que aqueles encontrados em produtos comerciais, podendo assim dizer que a qualidade de baixo custo foi atingida em nosso trabalho. A Figura 5.1 apresenta os valores dos componentes encontrados nas lojas de eletrônicos e uma estimativa do preço total do kit.

As atividades propostas foram elaboradas visando atingir o conteúdo básico em energia solar e seus fundamentos, conforme referenciados nos Itinerários Formativos do EnergIF para a Rede Federal. Assim, esperamos que este trabalho possa servir aos interesses e objetivos do ensino técnico em energia solar fotovoltaica, na Rede Federal e em geral, auxiliando o professor em suas tarefas de ensino e disponibilizando ao aluno material para uma aprendizagem efetiva da tecnologia, contribuindo também com o avanço da modalidade renovável no Brasil. Apesar de desejável, não foi possível realizar uma aplicação do kit e dos roteiros em turmas de ensino técnico. Entretanto, acreditamos que este trabalho possa ser futuramente continuado, de modo que a sua aplicação prática irá revelar o real potencial de uso em sala de aula, bem como possíveis falhas de concepção.

Tabela 5.1: Preço discriminado dos componentes e estimativa do preço total do kit. \*O custo deste item não entrou no cálculo, pois se entende o uso comum destes em laboratório. \*\*O valor do frete não está incluso e deve ser cotado com o fornecedor escolhido. \*\*\*Os aparelhos de medida não entram na cotação dos custos, pois também se entende que são comuns nos laboratórios.

Componente	Preço	Quantidade	Total
Sensor de Temperatura	R\$14,00	1	R\$14,00
Cabo de três vias	R\$3,50	1	R\$3,50
Potenciômetro de 1k	R\$3,00	1	R\$3,00
Bateria 9V	R\$11,00	1	R\$11,00
LED's	R\$0,50	4	R\$2,00
Mini chaves	R\$0,80	3	R\$2,40
Pilha recarregável (embalagem com duas unidades)	R\$20,00	1	R\$20,00
Caixa plástica para pilha aaa	R\$2,50	2	R\$5,00
Conectores garra jacaré (tamanho médio)	R\$2,00	2	R\$4,00
Clip para bateria	R\$4,00	1	R\$4,00
Conector borne (3mm)	R\$2,00	8	R\$16,00
Conector barra de pinos fêmea 1x40	R\$1,50	1	R\$1,50
Conector barra de pinos estampado 90º 1x40x14,6	R\$1,50	1	R\$1,50
Cabo e fios de conexão *			R\$0,00
Kit 10 células solares 52x39mm **	R\$15,90	1	R\$15,90
Placa de circuito impresso (material total utilizado)	R\$30,00	1	R\$30,00
Resistores (média estipulada)	R\$0,25	3	R\$0,75
Percloroeto de ferro	R\$20,00	1	R\$20,00
Total***			R\$154,55

Fonte: Autor.

Como trabalhos futuros para melhoria do kit, pretendemos produzir novos módulos e elaborar novas atividades, de forma a enfatizar outras práticas em energia solar fotovoltaica. Outra opção sugerida para manipulação dos experimentos é o uso de *protoboards* ao invés da soldagem dos componentes nas placas de fenolite. O único módulo que não poderia ser alterado é o Módulo Fotovoltaico. Foi verificado que a exposição das células neste módulo compromete a sua preservação, devido a sua fragilidade mecânica. Para superar este problema, propomos resinar o módulo aplicando em sua superfície resina epóxi transparente ou utilizar uma placa de vidro para cobrir as células. Além disso, pretendemos produzir protótipos de suporte de células e módulos utilizando impressão 3D, dado a grande difusão de impressoras 3D e a possibilidade de muitos adquirirem seus arquivos remotamente. Sobre a técnica de impressão 3D, já contamos com trabalhos iniciados, onde pequenos módulos já foram impressos de modo a acomodarem as células e ainda permitirem suas conexões elétricas. Este trabalho encontra-se em andamento para a inclusão dos recursos necessários a realização das atividades experimentais.

## Referências

ALLEN, Myles R. *et al.* Global Warming of 1.5 °C: Framing and Context. **The Intergovernmental Panel on Climate Change**, Outubro 2018. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_Chapter1\\_Low\\_Revisions.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter1_Low_Revisions.pdf). Acesso: 30 mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Potencial de investimentos da energia fotovoltaica em galpões e armazéns é de 6,8 Bilhões. **www.absolar.org.br**. 2017. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/potencial-de-investimentos-da-energia-fotovoltaica-em-galpoes-e-armazens-e-de-r-68-bilhoes.html>. Acesso: 23 jan. 2019.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. New Energy Outlook 2018: BNEF's annual long-term economic analysis of the world's power sector out to 2050. **about.bnef.com**. 2018. Disponível em: <https://bnef.turtl.co/story/neo2018?teaser=true>. Acesso: 23 jan. 2019.

BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 482/2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Arquivo consultado em 27/05/2019.

BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 687/2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Arquivo consultado em 27/05/2019.

CANADIAN SOLAR. **Datasheet Módulo Silício Policristalino CS6P-255|260P**. Disponível em: <http://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto31509IdArquivo3638.pdf>. Acesso: 11 jul. 2019.

CHAGAS, Danyelle Queiroz Lima *et al.* (Re)visitando a sustentabilidade: a necessidade de uma nova ética. In: ENCONTROS UNIVESITÁRIOS, IV. 2012. **Anais eletrônicos...** Juazeiro do Norte - CE, 2012. Disponível em: <https://conferencias.ufca.edu.br/index.php/encontros-universitarios/eu-2012/paper/viewFile/1440/871>. Acesso: 20 jan. 2019.

COSTA, Thiago Queiroz; CHERPINSKI, Usley da Silva. Medição da eficiência de uma célula fotovoltaica: uma proposta de baixo custo para fins didáticos. **Física na Escola**, v. 16, n. 2, p. 73-77, 2018. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol16-Num2/a13.pdf>. Acesso: 4 abr. 2019.

DALIENTO, Santolo *et al.* A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. **Solar Energy**, v. 134, p. 218, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16300810?via%3Dihub>. Acesso: 1 jun. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia: 2027. **www.epe.gov.br**. 2018. 345 p. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027\\_aprovado\\_OFICIAL.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf). Acesso: 22 jan. 2019.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Balanço energético nacional. **www.epe.gov.br**. 2018. 294 p. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf). Acesso: 21 jan. 2019.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. O Compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: Produção e uso de energia. **www.epe.gov.br**. 2016. 96 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>. Acesso: 20 jan. 2019.

ENERGIF. Itinerários formativos em energias renováveis e eficiência energética. **www.energif.org**. 2018. 156 p. Disponível em: <http://www.energif.org/materiais/itinerario-formativo-energif.pdf>. Acesso: 11 fev. 2019.

ENERGIF. Sobre o EnergIF. **www.energif.org**. 2019. Disponível em: <http://www.energif.org/sobre.php>. Acesso: 10 fev. 2019.

EYZAGUIRRE, Claudia; SHERWOOD, Daniel. Unlocking 4 Commercial PV Design Secrets. **www.greentechmedia.com**. 2016. Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/unlocking-four-commercial-pv-design-secrets#gs.o8vdbt>. Acesso: 09 jul. 2019.

FARIAS, Victor. Nova geração de energia gera novos empregos: O panorama das renováveis no Brasil. **Profissionais para energias do futuro**, Agosto 2018. Disponível em: <http://www.energif.org/materiais/RevistaProfissionais.pdf>. Acesso: 11 fev. 2019.

GREENPRO. Conhecimentos elementares: Princípios funcionais de uma célula solar. *In*: GREENPRO. **Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. 2004. 368 p. cap. 2, p. 20-22. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>. Acesso: 10 abr. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos, 2017. 80 p. Disponível em: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html). Acesso: 17 jun. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global energy demand rose by 2.3% in 2018, its fastest pace in the last decade. **www.iea.org**. 26/03/2019. Disponível em: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/global-energy-demand-rose-by-23-in-2018-its-fastest-pace-in-the-last-decade.html>. Acesso: 18 abr. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key world energy statistics. **www.iea.org**. 2018. 51 p. Disponível em: [https://webstore.iea.org/download/direct/2291?fileName=Key\\_World\\_2018.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2291?fileName=Key_World_2018.pdf). Acesso: 21 jan. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Balances: Overview. **www.iea.org**. 2018. 26 p. Disponível em: [https://webstore.iea.org/download/direct/2263?fileName=World\\_Energy\\_Balances\\_2018\\_Overview.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2263?fileName=World_Energy_Balances_2018_Overview.pdf). Acesso: 18 jan. 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy and Jobs: 9.8 million in 2016. **www.irena.org**. 2017. 24 p. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/May/IRENA\\_RE\\_Jobs\\_Annual\\_Review\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/May/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2017.pdf). Acesso: 22 jan. 2019.

FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. Photovoltaics report. **www.ise.fraunhofer.de**. 2019. 47 p. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso: 15 jun. 2019.

KNOPKI, Roberta; JULIATTO, Marco Antônio. Ministério da Educação entra na onda das energias renováveis. **Profissionais para energias do futuro**, p. 15, Agosto 2018. Disponível em: <http://www.energif.org/materiais/RevistaProfissionais.pdf>. Acesso: 4 mar. 2019.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Solar Para Produção de Eletricidade**. 1. ed. Artliber, 2012. 232 p.

MELO, Paulo Roberto de Sousa, RIOS, Evaristo Carlos Duarte, GUTIERREZ, Regina Maria Vinhais. PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: MERCADO ATUAL E PERSPECTIVAS. **www.bndes.gov.br**. 2001. Disponível em: [https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set1406.pdf](https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set1406.pdf). Acesso: 1 jun. 2019.

MICHA, Daniel Neves. Notas de aula – Dispositivos e sistemas fotovoltaicos: Recurso solar. **https://sites.google.com/site/danielmichafisica**. 2019. 37 p. Disponível em: <https://sites.google.com/site/danielmichafisica/home/ensino/disciplinas/dispositivos-e-sistemas-fotovoltaicos?authuser=0>. (Slides). Acesso: 1 jun. 2019.

MICHA, Daniel Neves *et al.* **O atual desafio energético-ambiental mundial e a energia solar fotovoltaica**. Revista Tecnologia & Cultura, n. 31, p. 77-86, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Acordo de Paris. **www.mma.gov.br**. 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso: 19 jan. 2019.

PAINES, Patrícia de Andrade. **Desenvolvimento de kit didático de geração de energia solar**. Santa Maria - RS, 2014. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia de Produção) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8319/PAINES%2C%20PATRICIA%20DE%20ANDRADE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 4 abr. 2019.

PEDROSA FILHO, Manoel H.O. *et al.* Desenvolvimento de itinerários formativos para a educação profissional e tecnológica na área de energia solar fotovoltaica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII. 2018. **Anais eletrônicos**. Gramado - RS. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/471>. Acesso: 5 mar. 2019.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. 530 p. (Apostila). Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_Fv\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_Fv_2014.pdf). Acesso: 15 jun. 2019.

REZENDE, Sérgio Machado. **Materiais E Dispositivos Eletrônicos**. 4. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2015. 440 p.

SERÉ, Marie-Geneviève; COELHO, Suzana Maria; NUNES, Antônio Dias. O papel da experimentação no ensino da Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [online], v. 20, n. 1, p. 30-42, 2003. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6560/6046>. Acesso: 23 mai. 2019.

SILVA, R. Células solares "caseiras". **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [online], v. 16, n. 4, p. 379-384, 2004. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172004000400012&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172004000400012&script=sci_abstract&tlng=es). Acesso: 4 abr. 2019.

YOURHOME. Photovoltaic systems. **www.yourhome.gov.au**. 2014. Disponível em: <http://www.yourhome.gov.au/energy/photovoltaic-systems>. Acesso: 5 abr. 2019.

## **Anexos**

## **Atividade 1: Conhecendo o fenômeno de conversão fotovoltaica**

**Pré-Requisitos:** Nenhum.

### **Objetivo geral:**

- Compreender o processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica através de uma sequência de células solares e aplicações práticas de seu uso.

### **Objetivos específicos:**

- Observar o processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica.
- Utilizar células solares na alimentação de uma carga.
- Utilizar células solares no carregamento de bateria.
- Perceber a influência de fatores externos, tais como a temperatura e a irradiância, na geração fotovoltaica.

### **1. Introdução teórica**

No dia-a-dia, utilizamos a energia elétrica de duas formas básicas: no funcionamento de dispositivos ou armazenando-a em pilhas ou baterias para seu uso posterior. Nesta atividade, é proposto ao aluno a utilização de células solares em um circuito elétrico simples. A energia elétrica gerada pelas células será utilizada no acionamento de um LED e no carregamento de pilhas recarregáveis e no seu eventual descarregamento, representando as duas formas básicas de utilizar a energia gerada e ainda de forma limpa e sustentável.

O processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica acontece por meio do efeito fotovoltaico. Existem diversas tecnologias que exploram esse fenômeno a fim de gerar energia elétrica, a mais comum é a célula fotovoltaica, ou solar, de silício cristalino. Ao ser iluminada, a célula produz uma tensão elétrica em seu interior. Os contatos elétricos, frontal e traseiro, permitem que condutores externos sejam conectados e assim que haja fluxo de corrente elétrica.

A geração de energia fotovoltaica é profundamente influenciada por alguns fatores locais e do ambiente. Ao aumentar a temperatura da célula, ou módulo, por

exemplo, a corrente gerada é levemente acrescida, entretanto, a tensão é amplamente reduzida, assim, diminuindo-se a geração de energia elétrica. Ao contrário, diminuindo-se a temperatura, provoca-se um aumento na geração final de energia. Já a radiação luminosa incidente nas células, ao ser reduzida, compromete a geração tanto de corrente como de tensão elétricas, entretanto, a tensão é menos afetada. Aumentando-se a radiação luminosa incidente, a geração de energia elétrica também aumenta. Outro fator estritamente prejudicial à geração de energia é o sombreamento. Ao sombrear uma célula em um módulo, pode-se comprometer toda a geração de energia.

## 2. Atividades experimentais

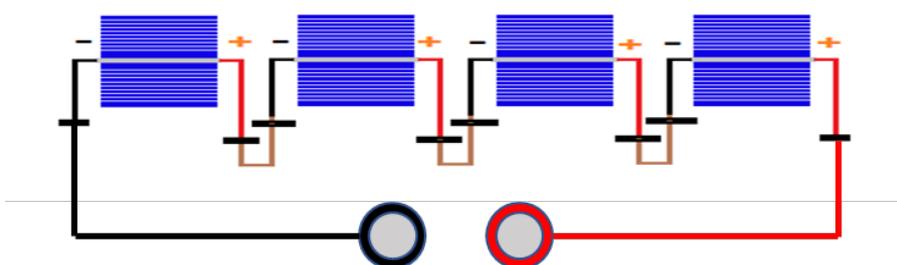
### Material necessário

- Módulo Fotovoltaico
- Módulo de Dispositivos Luminosos
- Módulo de Armazenamento
- Fonte de luz de lâmpada incandescente
- Voltímetro

### Parte 1

Inicialmente, deve-se conectar as 4 células existentes no Módulo Fotovoltaico entre si, de modo que o conjunto esteja em série e forneça aproximadamente 2,0 V sob iluminação. Para isso, monte o circuito como o esquema abaixo:

Figura 0:1: Conexão em série das células no Módulo Fotovoltaico.



Fonte: Autor.

Meça a tensão com um voltímetro nos terminais principais do Módulo Fotovoltaico e verifique se a tensão está na faixa correta. Em caso contrário, aproxime a fonte de luz do Módulo.

Em seguida, conecte o Módulo de Dispositivos Luminosos ao Módulo Fotovoltaico.

Acione as chaves que acendem os LEDs e observe o acionamento dos dispositivos luminosos através da conversão de energia luminosa em energia elétrica. Sobre isso, responda:

1) Descreva as transformações de energia ocorridas no processo para acionamento do LED? Qual é o papel das células solares no processo?

---

---

---

---

Mantenha a lâmpada acesa e sombreie o conjunto de células (com uma folha de papel, por exemplo). Sobre isso, responda:

2) O que acontece com o brilho dos LEDs? O que você pode dizer sobre a geração de energia fotovoltaica neste caso? Cite objetos que possam causar sombreamento e que prejudicam um sistema fotovoltaico?

---

---

---

---

Movimente a fonte de luz, mudando o ângulo de incidência e a distância da fonte de luz às células. Sobre isso, responda:

3) O que acontece quando a fonte de luz se afasta das células? Que situação está sendo simulada neste caso?

---

---

---

---

4) Existe alguma configuração de posicionamento da lâmpada (ângulos para uma dada distância) em que o brilho dos LEDs se torna máximo? Como você pode relacionar o posicionamento das células sob o Sol em uma situação real com a do experimento realizado de forma a aproveitar o máximo do recurso solar?

---

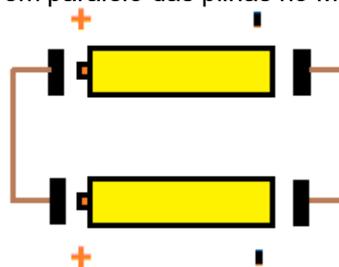
---

---

---

Associe as pilhas em paralelo utilizando os cabinhos de conexão, conforme esquema abaixo:

Figura 0:2: Conexão em paralelo das pilhas no Módulo Armazenamento.



Fonte: Autor.

Conecte o módulo fotovoltaico ao Módulo de Armazenamento. Neste momento, as pilhas começam a ser carregadas. Para notificar o carregamento das pilhas, o LED do Módulo de Armazenamento deverá acender. Sobre isso, responda:

5) Descreva as transformações de energia ocorridas no processo para o carregamento das pilhas? Qual é o papel das células solares no processo?

---

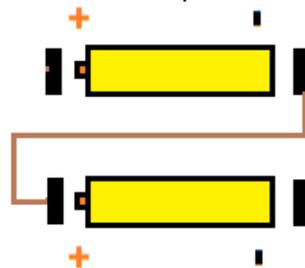
---

---

---

Em seguida, desconecte o Módulo Fotovoltaico e associe as pilhas em série conforme o esquema abaixo:

Figura 0:3: Conexão em série das pilhas do Módulo Armazenamento.



Fonte: Autor.

Conecte o módulo de armazenamento com o módulo de dispositivos luminosos. Utilize as chaves existentes no Módulo de Dispositivos Luminosos para acender os LEDs. Sobre isso, responda:

6) Que tipo de sistema fotovoltaico as atividades com as pilhas representam?

---

---

Baseado nos experimentos realizados, responda:

7) Como a energia solar fotovoltaica pode ser utilizada na prática? Que fatores influenciam seu desempenho?

---

---

---

---

8) Sem iluminação, um sistema fotovoltaico não gera energia. Cite uma forma de usar a energia solar gerada durante o período de iluminação para acionar dispositivos mesmo na ausência de fontes luminosas.

---

---

---

---

9) Cite alguns benefícios no uso da energia solar fotovoltaica:

---

---

---

---

---

---

---

---

## Atividade 2: Medindo o desempenho elétrico de uma célula solar

**Pré-Requisitos:** Eletricidade básica, instrumentação elétrica.

### Objetivos gerais:

- Compreender o desempenho e parâmetros elétricos de uma célula solar

### Objetivos específicos:

- Obter através da instrumentação os parâmetros elétricos de uma célula solar
- Obter as curvas características de uma célula solar e comparar com modelos em condições de teste padrão
- Calcular os demais parâmetros elétricos a partir da curva I-V.

### 1. Introdução Teórica

Analogamente às fontes de energia convencionais, a potência fornecida pela célula solar depende da carga que ela alimenta. Porém, ela é muito mais sensível às variações de resistência da carga. O valor de resistência que essa carga apresentar determinará em quais condições de tensão e corrente elétrica a célula solar irá operar, conseqüentemente, a quantidade de potência fornecida.

$$P = V \cdot I$$

A partir desse fenômeno é possível entender a performance de uma célula solar ao construir seu gráfico de corrente por tensão e de potência por tensão para diferentes cargas. Além disso, as principais características elétricas de uma célula ou de um módulo solar são resumidas em sua curva I-V, de onde os parâmetros elétricos podem ser derivadas, tal como sua eficiência de conversão fotovoltaica. Essas informações compõem os dados elétricos do *datasheet* ou detalhamento técnico da célula que a especificam como produto tecnológico. Entretanto, essas informações precisam ser obtidas em condições padrão de teste para que cada produto, a célula solar e sua tecnologia, sejam sujeitas às mesmas condições. As condições de teste padrão (STC – Standard Test Conditions) determinam uma

irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  sob a célula, uma temperatura de célula de  $25^\circ \text{ C}$  e uma distribuição espectral de massa de ar de 1,5.

Os principais parâmetros encontrados na curva I-V são:

- Corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ )
- Tensão de circuito de aberto ( $V_{OC}$ )
- Ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ )

A corrente de curto circuito é o valor máximo de corrente que uma célula pode fornecer. Pode ser obtido ao colocar os terminais da célula diretamente com um amperímetro. Esse valor é aproximado, dado que o próprio amperímetro acaba por funcionar como uma pequena carga. Apesar de ser a corrente máxima fornecida, o valor da tensão é nulo gerando nenhuma potência.

A tensão de circuito aberto é o valor máximo de tensão que uma célula pode fornecer. Pode ser obtida ao colocar um voltímetro diretamente nos terminais da célula. Apesar de ser a tensão máxima, o valor da corrente nesse ponto de tensão é nulo e, portanto, a potência entregue também é nula.

Na curva I-V, existe um único par de pontos de corrente e tensão que fornece o valor máximo de potência  $P_{MP}$ . São os pontos  $I_{MP}$  e  $V_{MP}$ , corrente de máxima potência e tensão de máxima potência, respectivamente. Esse valor no *datasheet* é representado em Wp (Watt-pico), indicando a potência máxima da célula ou módulo solar. O fator de forma da curva I-V é obtido pela razão entre a potência máxima e o produto entre a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto:

$$FF = \frac{I_{MP} V_{MP}}{I_{SC} V_{OC}}$$

A eficiência de conversão fotovoltaica máxima é, então, obtida a partir da razão entre a potência elétrica máxima e a potência luminosa incidente ( $P_{inc}$ ):

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{inc}}$$

Para se obter vários valores de tensão e corrente elétricas, utiliza-se um potenciômetro que é um dispositivo capaz de fornecer um intervalo de valores de resistência. Ao girar seu cursor pelo material resistivo que compõe o potenciômetro, será apresentado um determinado valor de resistência, usado para obter os valores de tensão e corrente que a célula solar entrega para esta carga.

## 2. Atividades experimentais

### Material necessário

- Módulo Fotovoltaico e Módulo de Carga
- 2 folhas milimetradas
- 2 multímetros
- Fonte de luz (lâmpada incandescente 60 Watts ou de LED 15 Watts)

### Procedimento experimental

Com o Módulo Fotovoltaico, conecte o polo positivo e o polo negativo de uma das células aos terminais de pinos. Em seguida, conecte o multímetro em série com o módulo, na função amperímetro, no borne positivo, e conecte o Módulo de Carga ao amperímetro e ao borne negativo do módulo. Por fim, conecte o multímetro na função de voltímetro em paralelo com o módulo.

Montado o esquema acima, ilumine a célula com a fonte de luz. Em seguida utilize o Módulo de Carga para medir os pontos de tensão e corrente variando seu cursor pelo material resistivo que o compõe e anote os valores medidos na tabela abaixo. Deve-se medir a  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  e oito pontos.

Ponto	Corrente (mA)	Tensão (V)	Potência (mW)
Curto circuito			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
Circuito aberto			

1) Com os valores obtidos e registrados na tabela acima, construa a curva I-V e a curva P-V nos papéis milimetrados, respeitando ao máximo a escala dos valores obtidos.

2) Com os gráficos construídos, calcule os parâmetros elétricos da célula solar. Estime o valor da irradiância obtida com a sua fonte de luz para poder calcular a eficiência da célula.

<b>Parâmetros elétricos</b>	<b>Valor</b>
$I_{SC}$	
$V_{OC}$	
$I_{MP}$	
$V_{MP}$	
$P_{MP}$	
FF	
Eficiência	

3) O modelo de curva I-V e P-V obtido assemelha-se com os modelos típicos de curvas I-V de módulos comerciais? Se não, o que explica as diferenças?

---

---

---

---

4) Compare os parâmetros elétricos obtidas com os valores típicos para células ou módulos de silício comerciais.

---

## Atividade 3: Associação de células solares em série e paralelo

**Pré-Requisitos:** Eletricidade básica, instrumentação elétrica.

### Objetivos gerais:

- Compreender o fenômeno de associações de células solares

### Objetivos específicos:

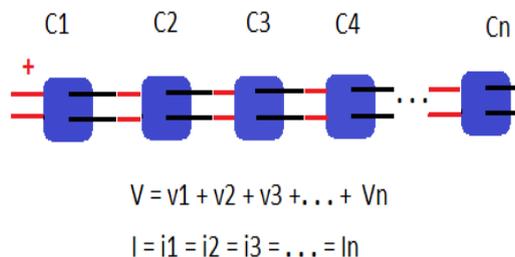
- Verificar os efeitos na tensão e corrente elétricas de acordo com as associações realizadas
- Verificar os efeitos das associações na curva I-V

## 1. Introdução Teórica

Os módulos solares são constituídos por inúmeras células solares, a depender do seu dimensionamento elétrico proposto comercialmente. Módulos de 36, 60 e 72 células podem ser encontrados no mercado. A finalidade de construir módulos com muitas células vem do fato de que apenas uma célula produz uma tensão muito baixa para aplicações reais. Para formar os módulos as células são comumente associadas em série de forma a aumentar sua tensão.

### Conexão em série

Figura 0:4: Conexão em série de células.



Fonte: Autor.

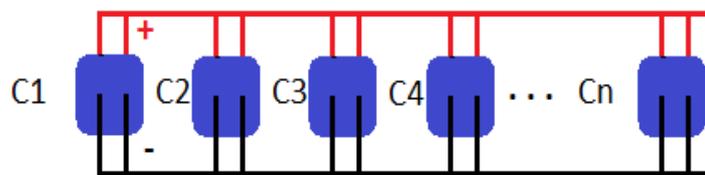
Como mostra a figura acima, a parte frontal da célula é conectada à sua parte traseira realizando assim uma conexão entre seu polo negativo e positivo, caracterizando uma conexão em série entre as células. As tensões, portanto, se

somam e aumentam à medida que mais células são conectadas enquanto a corrente permanece a mesma por toda a sequência de células.

### Conexão em paralelo

Uma outra maneira de associar as células é conectando-as em paralelo. Para isso, é necessário conectar em comum todos os polos positivos da sequência de células simultaneamente e o mesmo com os polos negativos, conforme mostra o esquema abaixo.

Figura 0:5: Conexão em paralelo de células



$$I = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + \dots + i_n$$

$$V = v_1 = v_2 = v_3 = \dots = v_n$$

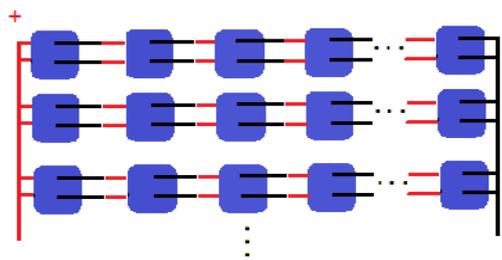
Fonte: Autor.

Neste tipo de conexão, as correntes elétricas geradas pelas células são somadas enquanto a tensão permanece a mesma por toda sequência de células.

### Conexão mista

Pode-se ainda realizar uma associação mista, conectando as células tanto em série como em paralelo, como se segue no esquema abaixo.

Figura 0:6: Associação mista de células



$$V = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + \dots$$

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots$$

Fonte: Autor.

Em uma associação mista, a tensão será somada de acordo com o número de células conectadas em série enquanto a corrente será somada de acordo com o número de sequências associadas em paralelo.

## 2. Atividades experimentais

### Material necessário

- Módulo Fotovoltaico e cabinhos de conexão
- 2 multímetros
- Fonte de luz (lâmpada incandescente 60 Watts ou de Led 15 Watts)
- Papel milimetrado

### Procedimentos experimentais

#### Parte 1

Com o amperímetro ligado em série e o voltmímetro ligado em paralelo com os terminais do módulo fotovoltaico, associe as células em série no módulo formando sequências e anote os valores na tabela abaixo.

Parâmetro	Configuração das células Ci			
	C1	C1 + C2	C1 + C2 + C3	C1 + C2 + C3 + C4
$V_{OC}$ (V)				
$I_{SC}$ (mA)				

1) Esboce a curva I-V das sequências formadas no papel milimetrado seguindo o modelo de curva obtido no roteiro de atividades anterior. Utilize os valores de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  como referência para estimar a curva.

2) Os valores de tensão e corrente correspondem aos apresentados na introdução teórica? E o modelo de curva I-V construído?

---

---

## Parte 2

Associe as células em paralelo formando sequências e anote os valores na tabela abaixo.

Parâmetro	Configuração das células $C_i$			
	C1	C1 + C2	C1 + C2 + C3	C1 + C2 + C3 + C4
$V_{OC}$ (V)				
$I_{SC}$ (mA)				

1) Esboce a curva I-V das sequências formadas no papel milimetrado seguindo o modelo de curva obtido no roteiro de atividades anterior. Utilize os valores de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  para estimar a curva.

2) Os valores de tensão e corrente correspondem aos apresentados na introdução teórica? E o modelo de curva I-V construído?

---

---

3) Desafio: dobre a tensão e a corrente do módulo fotovoltaico através das associações das células.

4) Desafio: realize a conexão *leapfrog*.

## **Atividade 4: Investigando a Influência da Irradiância, Temperatura e Sombreamento**

**Pré-Requisitos:** Eletricidade básica, instrumentação elétrica.

### **Objetivos gerais:**

- Compreender a influência da temperatura, irradiância e sombreamento no desempenho de uma célula solar.

### **Objetivos específicos:**

- Realizar medidas de corrente e tensão de uma célula fotovoltaica para diferentes irradiâncias.
- Realizar medidas de corrente e tensão para diferentes temperaturas de operação de uma célula fotovoltaica.
- Observar os efeitos do sombreamento na corrente de uma célula fotovoltaica.
- Obter a curva I-V da célula sob as influências de fatores externos.

### **1. Introdução Teórica**

O desempenho elétrico das células fotovoltaicas é afetado diretamente pelo sombreamento, pela irradiância que a atinge e pela sua temperatura de operação. Da mesma maneira, os módulos são afetados e, por esta razão, estes fatores devem ser levados em consideração em uma instalação fotovoltaica, pois determinam sua viabilidade técnica e garantem uma expectativa real da geração de energia.

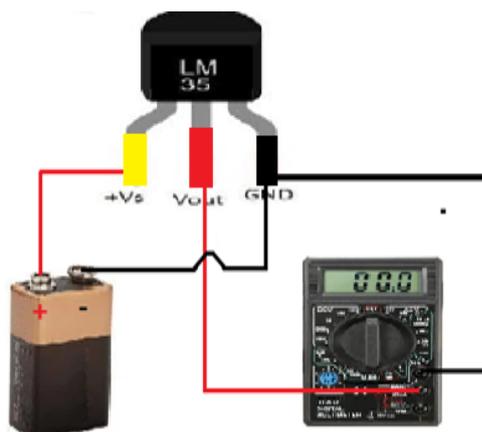
A quantidade de irradiância que chega a uma célula pode ser alterada pela distância da célula à fonte de luz e pelo seu ângulo de incidência. Ao alterar a quantidade de irradiância incidente, a corrente e a tensão da célula são modificadas de maneiras diferentes. Elevando a quantidade de irradiância, um maior aumento pode ser observado na geração de corrente enquanto a tensão aumenta em proporções menores.

O sombreamento das células prejudica a geração de energia e a integridade das células. Ao sombrear uma célula, sua corrente é reduzida e todo o conjunto de

células, em um módulo, passa a funcionar com a corrente limitada à esta redução gerando menos energia elétrica. Esta mesma célula sombreada também se comporta como uma carga para as outras células do conjunto, recebendo toda a energia e dissipando-a em forma de calor e elevando sua temperatura. Este fenômeno é conhecido como ponto quente ou *hotspot* e seus efeitos são extremamente prejudiciais e irreversíveis. Por este motivo, convém utilizar diodos de desvio que desviam a corrente da célula sombreada, reduzindo os efeitos negativos de sombreamento.

Para medir a temperatura das células, será utilizado o sensor de temperatura LM35. A utilização deste componente consiste em utilizar uma fonte de tensão externa de 5V a 20V e alimentar o pino de entrada (+Vs). Em seguida, conectar no pino de saída (Vout) o voltímetro e ambos os polos negativos da fonte de tensão externa e do voltímetro devem ser conectados no pino *ground* (GND), conforme a Figura 1 indica.

Figura 1: Utilização do sensor de temperatura no Módulo Fotovoltaico: pino amarelo – entrada de energia; pino vermelho – saída para medição; pino preto – comum.



Fonte: Autor.

Este componente apresenta uma saída de tensão proporcional a temperatura na escala de graus Celsius, para cada 10 mV lido no pino de saída corresponderá a 1°C. Por exemplo, caso o voltímetro leia 0,250 V ou 250 mV corresponderá a 25 °C, caso o voltímetro leia 0,221 V ou 221 mV corresponderá a 22,1 °C.

## 2. Atividades experimentais

### Material necessário

- Módulo Fotovoltaico
- Bateria 9 V
- Pedaco de papel ou semelhante para sombrear as células
- 2 multímetros
- Fonte de luz (lâmpada incandescente 60 Watts ou de LED 15 Watts)
- Régua
- Papel milimetrado

### Procedimento experimental

#### Parte 1 - Efeitos da irradiância

Com o Módulo Fotovoltaico, conecte uma célula ou mais células em sequência nos terminais do módulo e os terminais deste ao amperímetro para medir diretamente  $I_{SC}$  ou ao voltímetro para medir diretamente a  $V_{OC}$ . Ilumine o módulo com a fonte de luz e meça distâncias regulares entre o módulo e a fonte com a régua, reduzindo à metade cada medida de distância entre fonte e módulo. Realize as leituras de corrente e anote-as na tabela abaixo.

Distância (cm)	$I_{SC}$ (mA)	$V_{OC}$ (V)

Sobre a atividade, responda:

1) O que acontece com a corrente ao mudar a distância da fonte de luz às células? E com a tensão?

---

---

---

2) A dependência quantitativa da mudança da corrente com a irradiância está de acordo com o esperado (comportamento linear)? Para analisar essa dependência, considere que a potência de uma fonte cai com o inverso do quadrado da distância.

---

---

3) No papel milimetrado, esboce a curva I-V utilizando os valores de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  encontrados como referência. Utilize a curva I-V obtido na atividade “Medindo o desempenho elétrico de uma célula solar” como modelo.

### Parte 2 – Efeitos da temperatura

Conecte a célula, na qual o sensor de temperatura está acoplado, aos terminais do módulo e o voltímetro aos terminais deste. Alimente o sensor de temperatura com a bateria e conecte-o a outro voltímetro. Posicione a fonte de luz o mais próximo da célula e tome as medidas de temperatura para os instantes de tempo propostos, anotando os dados na tabela abaixo.

Tempo	Temperatura (°C)	$V_{OC}$ (V)
0		
30 segundos		
1 minuto		
2 minutos		
3 minutos		
4 minutos		

Repita o procedimento acima para a medida de  $I_{SC}$  da célula. Para isso, conecte um amperímetro aos terminais do Módulo Fotovoltaico. Anote os dados na tabela abaixo.

Tempo	Temperatura (°C)	$I_{SC}$ (mA)
0		
30 segundos		
1 minuto		
2 minutos		
3 minutos		
4 minutos		

Sobre as atividade, responda:

4) Como a temperatura afeta a  $V_{OC}$  e a  $I_{SC}$  da célula? Considerando que o FF não é muito afetado, discuta o que deve ocorrer com a eficiência da célula com o aumento da temperatura.

---



---



---



---

5) Desafio: estime os coeficientes de temperatura da  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  e da potência usando os dados obtidos nas tabelas.

$$\frac{\Delta V_{OC}}{V_{OC}} / \Delta T = \text{___} \% / ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta I_{SC}}{I_{SC}} / \Delta T = \text{___} \% / ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta P}{P} / \Delta T = \text{___} \% / ^\circ\text{C}$$

### Parte 3 – Efeitos do sombreamento

Conecte uma célula aos terminais positivo e negativo do módulo e os terminais deste a um amperímetro. Associe as células em série e cubra uma parte da célula nas proporções especificadas na tabela e realize as leituras de corrente no amperímetro. Anote as medidas na tabela.

Parte sombreada	$I_{SC}$ (mA)
Sem sombreamento	
Metade da célula coberta	
Célula completamente coberta	

Associe as quatro células em paralelo e repita a etapa acima em uma das células da sequência, anotando as leituras de corrente na tabela abaixo.

Parte sombreada	$I_{SC}$ (mA)
Sem sombreamento	
Metade da célula coberta	
Célula completamente coberta	

Sobre as atividades, responda:

6) O que acontece com a associação em série ao ser sombreada? E na associação em paralelo de células?

---

---

---

---

7) Discuta como o sombreamento pode afetar a geração fotovoltaica em uma residência ou usina.

---

---

---

8) Discuta formas de evitar perdas mediante situações onde o sombreamento é inevitável. Utilize desenhos, caso necessário.

---

---

---

---

## Anexo E: Exemplos de Plano de Ensino Técnico

 <p>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA SÃO PAULO</p>	<p><b>CAMPUS</b></p> <p><b>BOITUVA</b></p>
<p><b>1- IDENTIFICAÇÃO</b></p>	
<p><b>Curso: Instalador de Sistemas fotovoltaicos</b></p>	
<p><b>Componente: Tecnologia solar fotovoltaica: módulos, arranjo e células</b></p>	
<p><b>Total de horas: 16</b></p>	
<p><b>Abordagem Metodológica:</b></p> <p>T ( )    P ( )    T/P (X)</p>	<p><b>Uso de outros ambientes além da sala de aula?</b></p> <p>(X) SIM    ( ) NÃO    Laboratório de eletricidade</p>
<p><b>2 – EMENTA:</b></p> <p>A disciplina propiciará aos alunos a compreensão da conversão fotovoltaica e as diferentes tecnologias utilizadas na atualidade para tal, características elétricas das células fotovoltaicas, tipos de associação de células e módulos fotovoltaicos e aspectos construtivos de tais componentes.</p>	
<p><b>3 – OBJETIVOS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender o efeito fotovoltaico;</li> <li>• Compreender as características das células fotovoltaicas;</li> <li>• Conhecer as características e os componentes de diferentes tipos de módulos fotovoltaicos;</li> <li>• Identificar as características e os parâmetros relacionados aos arranjos fotovoltaicos.</li> </ul>	
<p><b>4 – METODOLOGIA:</b></p> <p>Os conceitos e teorias serão abordados em aulas expositivas com o auxílio de recursos multimídia, priorizando a participação ativa do aluno com questionamentos e discussões.</p> <p>As aulas práticas serão realizadas em laboratório de eletricidade com os alunos divididos em grupos, trabalhando de maneira colaborativa.</p>	
<p><b>5 – CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceitos básicos relacionados ao efeito fotovoltaico;</li> <li>• Estudo sobre tipos, produção e aspectos construtivos dos diversos tipos de células fotovoltaicas e seus princípios teóricos;</li> <li>• Interpretação da curva I x V de uma célula fotovoltaica;</li> <li>• Processo de construção de um módulo fotovoltaico;</li> </ul>	

- Características técnicas, componentes e parâmetros de funcionamento dos principais tipos de módulos fotovoltaicos;
- Estudo sobre arranjos em série e em paralelo das células fotovoltaicas;
- Utilização de diodos de desvio e de fileira;
- Caixa de ligações;
- Efeito das condições ambientes e locais (temperatura, sombreamento, etc.) sobre módulos e arranjos fotovoltaicos.

#### 6 – BIBLIOGRAFIA BÁSICA:

VILLALVA, MARCELO GRADELLA. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2a edição. 2015. Ed. Saraiva.

PINHO, JOÃO TAVARES; GALDINO, MARCO ANTÔNIO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014. CEPEL - CRESEB.

#### 7 – BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR:

**Atlas brasileiro de energia solar** / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira Jefferson Gonçalves de Souza. 2a ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p. (E-BOOK)

		<b>CAMPUS BOITUVA</b>	
<b>1- IDENTIFICAÇÃO</b>			
<b>Curso: Instalador de Sistemas fotovoltaicos</b>			
<b>Componente: Sistemas Fotovoltaicos: Isolados, Conectados à Rede, Híbridos, Bombeamento de Água</b>			
<b>Total de horas: 24</b>			
<b>Abordagem Metodológica:</b>		<b>Uso de outros ambientes além da sala de aula?</b>	
T ( )	P ( )	T/P ( x )	(X) SIM ( ) NÃO Laboratório de eletricidade
<b>2 – EMENTA:</b>			
<p>A disciplina propiciará aos alunos conhecimentos dos diversos tipos de sistemas fotovoltaicos e suas peculiaridades. As características dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica serão aprofundados para que o aluno compreenda as leis e normas brasileiras, condições de instalação e medições relacionadas a esses tipos</p>			

de sistemas.

### **3 – OBJETIVOS:**

- Conhecer os sistemas fotovoltaicos isolados;
- Conhecer os sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Conhecer outras aplicações dos sistemas fotovoltaicos.

### **4 – METODOLOGIA:**

Os conceitos e teorias serão abordados em aulas expositivas com o auxílio de recursos multimídia, priorizando a participação ativa do aluno com questionamentos e discussões.

As aulas práticas serão realizadas em laboratório de eletricidade com os alunos divididos em grupos, trabalhando de maneira colaborativa.

### **5 – CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:**

- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos isolados;
- Medição de parâmetros em sistemas fotovoltaicos isolados;
- Normas relacionadas com os sistemas fotovoltaicos isolados;
- Instalação elétrica (quadro elétrico, cabeamento, proteções contra descargas atmosféricas, disjuntores, fusíveis e outros elementos do circuito elétrico) relacionada com a aplicação;
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Medição de parâmetros em sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Normas relacionadas com os sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Instalação elétrica (quadro elétrico, cabeamento, proteções contra descargas atmosféricas, disjuntores, fusíveis e outros elementos do circuito elétrico) relacionada com a aplicação;
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água;
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos de iluminação;
- Características dos equipamentos e componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos híbridos;
- Normas relacionadas com outras aplicações dos sistemas fotovoltaicos;
- Instalação elétrica (quadro elétrico, cabeamento, proteções contra descargas atmosféricas, disjuntores, fusíveis e outros elementos do circuito elétrico) relacionada com a aplicação.

### **6 – BIBLIOGRAFIA BÁSICA:**

VILLALVA, MARCELO GRADELLA. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos**

**e Aplicações.** 2a edição. 2015. Ed. Saraiva.

PINHO, JOÃO TAVARES; GALDINO, MARCO ANTÔNIO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** 2014. CEPEL - CRESEB.

**Atlas brasileiro de energia solar** / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rütger; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira Jefferson Gonçalves de Souza. 2a ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p. (E-BOOK).

#### **7 – BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR:**

AIUB, José Eduardo. **Eletrônica:** eletricidade, corrente contínua. São Paulo: Érica, 2007.

AIUB, José Eduardo; FILONI, Enio. **Eletrônica : Eletricidade – Corrente Contínua** 15. ed. São Paulo: Érica, 2009.

ALBUQUERQUE, Romulo Oliveira. **Análise de Circuitos em Corrente Alternada.** São Paulo: Érica, 2007.