

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Antonio Alfredo Andrade Chepluki

**Construção de equipamentos de baixo custo para análise de células solares
sensibilizadas por corantes**

Araranguá

2021

Antonio Alfredo Andrade Chepluki

Construção de equipamentos de baixo custo para análise de células solares sensibilizadas por corantes

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Energia.
Orientador: Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Dr.

Araranguá

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Chepluki, Antonio Alfredo Andrade

Construção de equipamentos de baixo custo para análise de células solares sensibilizadas por corantes / Antonio Alfredo Andrade Chepluki ; orientador, Tiago Elias Allievi Frizon, 2021.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Célula solar sensibilizada por corante. 3. Simulador solar. 4. Traçador I-V. I. Frizon, Tiago Elias Allievi. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Antonio Alfredo Andrade Chepluki

Construção de equipamentos de baixo custo para análise de células solares sensibilizadas por corantes

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Tatiana Gisset Pineda Vásquez, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Dr.
Orientador

Antonio Alfredo Andrade Chepluki
Autor

Araranguá, 20 de setembro de 2021.

Dedico este trabalho à minha avó Marta (*in memoriam*), que demonstrava muito interesse na minha carreira acadêmica, sempre desejando sucesso e me incluindo em suas orações.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo apoio e incentivo que possibilitaram chegar até esse momento.

Aos meus pais, pela excelente educação e exemplos repassados.

Aos meus amigos Gustavo e Raphael que estiveram ao meu lado em todos os momentos da graduação, sempre disponíveis independente da situação.

Ao professor Tiago, por todo apoio, orientação e conhecimentos repassados.

A todos os professores que incentivaram a seguir o caminho da ciência.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela formação gratuita e de qualidade, bem como todas as pessoas que lutam para que esses direitos sejam garantidos.

Ao Laboratório de Materiais Avançados, que forneceu toda a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

A equipe do Laboratório, que sempre esteve presente e apta a ajudar.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram com o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

RESUMO

O aproveitamento do recurso solar é uma das principais alternativas para fornecer a energia necessária para o progresso da humanidade. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a obtenção de energia por meio desse recurso é de extrema importância. Em meio as tecnologias disponíveis, destacam-se as células fotovoltaicas, as quais permitem a conversão direta da radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Existem vários dispositivos capazes de gerar energia dessa forma, onde os mais populares são os baseados em silício. Entretanto, existem tecnologias mais recentes que vêm sendo desenvolvidas, como as células baseadas em moléculas orgânicas, pontos quânticos, perovskitas e as sensibilizadas por corante. Esta última apresenta grande potencial, pois sua fabricação é mais simples e barata do que as células de silício. Entretanto, para possibilitar a sua inserção no mercado, ainda existem desafios que precisam ser superados, como a melhoria na estabilidade e no tempo de vida das células. No Laboratório de Materiais Avançados da UFSC são sintetizadas moléculas orgânicas com potencial aplicação nessa classe de células. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver os equipamentos necessários para que seja possível realizar uma avaliação do potencial de aplicação dessas moléculas. A avaliação de uma célula fotovoltaica, independente da tecnologia, deve seguir padrões de teste internacionais, onde a radiação incidente sobre o dispositivo deve ser de 1000W/m^2 com distribuição espectral similar ao espectro AM1,5 e a temperatura da célula durante o teste deve ser de $25\text{ }^\circ\text{C}$. Para isso são empregados simuladores solares, dispositivos que permitem a obtenção dessas condições de iluminação em um ambiente interno. Associado ao simulador solar, é necessário o emprego de outro equipamento capaz de obter os parâmetros elétricos da célula em uma curva de corrente por tensão, a qual é utilizada para avaliar o desempenho da célula, este equipamento é denominado traçador I-V. Neste trabalho esses equipamentos são construídos adaptando materiais presentes na literatura, utilizando componentes de baixo custo, fornecendo os equipamentos necessários para que seja possível realizar uma avaliação preliminar das células solares desenvolvidas no laboratório. Para testar o simulador solar e o traçador I-V construídos, foram obtidas as curvas de tensão e corrente para células solares sensibilizadas por corantes naturais. Além disso, são apresentadas as metodologias e as considerações realizadas na construção de tais equipamentos.

Palavras-chave: Célula solar sensibilizada por corante. Simulador solar. Traçador I-V.

ABSTRACT

The use of the solar resource is one of the main alternatives to supply the energy necessary for the progress of humanity. Thus, the development of technologies that make it possible to obtain energy through this resource is extremely important. Among the available technologies, photovoltaic cells stand out, which allow the direct conversion of solar radiation into electrical energy through the photovoltaic effect. There are several devices capable of generating energy in this way, the most popular being those based on silicon. However, there are more recent technologies that are being developed, such as cells based on organic molecules, quantum dots, perovskites and those sensitized by dye. The latter has great potential, as its manufacture is simpler and cheaper than silicon cells. However, to enable its insertion in the market, there are still challenges that need to be overcome, such as improving the stability and lifespan of cells. In the Advanced Materials Laboratory at UFSC, organic molecules with potential application in this class of cells are synthesized. Thus, this work aims to develop the necessary equipment so that it is possible to carry out an assessment of the potential application of these molecules. The evaluation of a photovoltaic cell, regardless of technology, must follow international test standards, where radiation incident on the device must be 1000 W/m^2 with spectral distribution like the AM1.5 spectrum and the temperature of the cell during the test must be $25 \text{ }^\circ\text{C}$. For this, solar simulators are used, devices that allow obtaining these lighting conditions in an indoor environment. Associated with the solar simulator, it is necessary to use other equipment capable of obtaining the electrical parameters of the cell in a current-by-voltage curve, which is used to evaluate the performance of the cell, this equipment is called the I-V tracer. In this work, these equipments are built by adapting materials present in the literature, using low-cost components, providing the necessary equipment so that it is possible to carry out a preliminary evaluation of the solar cells developed in the laboratory. To test the constructed solar simulator and I-V tracer, voltage and current curves for solar cells sensitized by natural dyes were obtained. In addition, the methodologies and considerations carried out in the construction of such equipment are presented.

Keywords: Dye sensitized solar cells. Solar simulator. I-V curve tracer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição espectral da irradiância solar em AM0, AM1,3 e AM1,5.....	20
Figura 2 - Espectro eletromagnético.....	21
Figura 3 - Configuração estrutural de uma junção p-n em uma célula fotovoltaica	23
Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma DSSC	27
Figura 5 – Complexo cianidina-3-glicosídeo-Ti ^{IV} formado pela absorção do corante pela superfície do TiO ₂	29
Figura 6 – Antocianinas: (a) cianidina-3-glicosídeo e (b) epeonidina-3-glicosídeo, R=glicose; (c) N719, TBA=Tetrabutilamonio; betalainas: (d) betacianinas e (e) betaxantina.	30
Figura 7 - Curva J-V e P-V de uma célula solar fotovoltaica	31
Figura 8 - Simulador solar da <i>Hoffman Eletronics Corp</i>	33
Figura 9 - Carga resistiva variável e curva I-V obtida a partir da carga resistiva variável	35
Figura 10 - Esquema de ligação do painel com a carga capacitiva e evolução da tensão e corrente em função do tempo	35
Figura 11 - Soquete contendo as lâmpadas de xenônio e halogênio (a) ao lado do reator (b) .	37
Figura 12 - Visão geral dos componentes e da construção do simulador solar.....	38
Figura 13 - Modelo recortável do espectrômetro	40
Figura 14 - Etapas de montagem do espectrômetro	41
Figura 15 – Espectrômetro	41
Figura 16 - Captura de tela do <i>software</i> durante a calibração do equipamento	42
Figura 17 – Imagem ilustrando a placa do Arduino UNO	44
Figura 18 - Circuito divisor de tensão	45
Figura 19 - Protótipo do traçador I-V.....	46
Figura 20 – Disposição dos componentes e traçador I-V finalizado.....	47
Figura 21 - Extratos dos corantes naturais das seguintes frutas/verduras: <i>blueberry</i> (a), <i>pitaya</i> (b), beterraba (c) e amora (d).....	49
Figura 22 - Filtração e armazenamento dos extratos.....	49
Figura 23 - Soluções para análise de absorção UV-Vis	50
Figura 24 - Etapas de preparo do eletrodo de TiO ₂	51
Figura 25 - Substratos com TiO ₂ antes (a) e depois da sinterização(b).....	52
Figura 26 - Sensibilização das DSSC's por meio de submersão nos extratos de <i>pitaya</i> , beterraba, <i>blueberry</i> e amora.....	52
Figura 27 - Deposição de carbono sobre os substratos (a-c) e eletrodos após a deposição (d)	53

Figura 28 – Imagem da solução eletrolítica armazenada em um <i>eppendorf</i>	54
Figura 29 - Disposição das camadas da célula solar (fora de escala).....	54
Figura 30 - Etapas de montagem das células: o eletrodo de TiO ₂ (a); o posicionamento do isolante (b); a inserção do eletrólito (c) e (d); o contra eletrodo contendo a deposição de carbono (e) e a célula solar após a montagem (f)	55
Figura 31 - Espectros obtidos com o espectrômetro desenvolvido neste trabalho	56
Figura 32 - Distribuição espectral da lâmpada fluorescente TKT 15 obtido pelo espectrômetro	57
Figura 33 - Distribuição espectral de uma lâmpada fluorescente tubular	57
Figura 34 - Calibração do simulador solar por meio do aplicativo <i>Photometer Pro</i> utilizando o sensor de um Samsung <i>Galaxy S8 Plus</i>	59
Figura 35 - Espectros das lâmpadas: halógena, de xenônio e do simulador	60
Figura 36 - Espectro do Sol em comparação ao simulador	60
Figura 37 – Distribuição do feixe de luz do simulador solar.....	61
Figura 38 - Análise UV-Vis dos extratos etanólicos de <i>pitaya</i> , <i>beterraba</i> , <i>amora</i> e <i>blueberry</i>	62
Figura 39 – Curva I-V da <i>pitaya</i> : carga capacitiva vs resistiva	64
Figura 40 - Curvas I-V das células solares sensibilizadas por corantes	65
Figura 41 - Curvas P-V das células solares sensibilizadas por corantes	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de um simulador solar de acordo com as suas especificações	33
Tabela 2 – Especificações das lâmpadas e do reator	37
Tabela 3 - Resolução do equipamento.....	64
Tabela 4 - Parâmetros fotoelétricos das células DSSC sensibilizadas pelos corantes naturais	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- ATX – *Advanced Technology Extended*
- CdTe – Telureto de Cádmio
- DSSC's - *Dye Sensitized Solar Cells*
- DVD-R – *Digital Video Disc Recordable*
- FF – Fator de forma
- GaAs - Arsenieto de gálio
- HID – *High Intensity Discharge*
- IDE – *Integrated Development Environment*
- IEC - *International Electrotechnical Commission*
- Imp – Corrente no ponto de máxima potência
- Isc – Corrente de curto-circuito
- ITO - Óxido de índio dopado com estanho
- JIS C – *Japanese Industrial Standards Committee*
- J_m – Densidade de corrente no ponto de máxima potência
- J_{sc} – Densidade de corrente de curto-circuito
- MDF - *Medium Density Fiberboard*
- OLED – *Organic Light Emitting Diode*
- OPV - *Organic photovoltaic*
- $P_{m\acute{a}x}$ – Potência máxima
- PQ's - Pontos quânticos
- TiO₂ - Dióxido de Titânio
- USB – *Universal Serial Bus*
- UV-Vis - Espectroscopia no ultravioleta-visível

V_{mp} – Tensão no ponto de máxima potência

V_{oc} – Tensão de circuito aberto

θ_z – Ângulo zenital

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	ENERGIA SOLAR.....	19
2.2	ESPECTROSCOPIA	20
2.3	O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	22
2.4	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	23
2.4.1	Primeira e segunda geração.....	24
2.4.2	Terceira geração	24
2.5	CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTES	25
2.5.1	Dióxido de titânio.....	28
2.5.2	Corantes sensibilizadores.....	28
2.6	CARACTERIZAÇÃO DE DSSC's.....	30
2.6.1	Simulador solar.....	32
2.6.2	Traçador de curvas I-V	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	SIMULADOR SOLAR	36
3.2	ESPECTRÔMETRO	39
3.3	TRAÇADOR DE CURVA I-V	43
3.4	MONTAGEM DAS CÉLULAS SOLARES	48
3.4.1	Extração dos corantes naturais	48
3.4.2	Preparo do eletrodo de TiO₂.....	50
3.4.3	Sensibilização dos eletrodos.....	52

3.4.4	Preparo do contra eletrodo	53
3.4.5	Eletrólito	53
3.4.6	Montagem das células.....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1	ESPECTRÔMETRO	56
4.2	SIMULADOR SOLAR	58
4.3	ANÁLISE UV-VIS DOS CORANTES	62
4.4	CURVAS I-V	63
5	CONCLUSÃO.....	69
5.1	PERSPECTIVAS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O principal caminho para que seja possível atingir o desenvolvimento sustentável é a inovação associada ao desenvolvimento de tecnologias de conversão e aproveitamento de recursos energéticos naturais. A energia é extremamente necessária para o desenvolvimento de um país, porém é importante que sejam aplicadas tecnologias que busquem o aumento da eficiência energética e a sustentabilidade da produção, de modo a possibilitar a redução dos impactos ambientais associados ao crescimento econômico (PEREIRA *et al.*, 2017).

A energia solar é um recurso energético gratuito e inesgotável na escala terrestre de tempo, sendo uma alternativa promissora para os desafios energéticos do novo milênio. Além disso, o Sol é responsável pela origem de quase todas as outras fontes de energia, é a partir da luz solar que se origina: o ciclo das águas que possibilita o represamento e consequente geração de eletricidade, a movimentação da atmosfera que possibilita a geração eólica, e até mesmo os combustíveis fósseis, pois originalmente, os resíduos orgânicos de plantas e animais obtiveram seu desenvolvimento a partir da energia solar (CRESESB, 2006).

Um das formas de aproveitar a energia solar é a partir de sistemas fotovoltaicos, onde a radiação solar é convertida diretamente em energia elétrica. Existem vários fatores que depõem de forma favorável a energia solar fotovoltaica: o alto rendimento por hectare, a modularidade, o “combustível” é gratuito, e os sistemas normalmente possuem baixo custo de manutenção e operação.

O custo por watt gerado pode ser reduzido com o aumento da eficiência das células solares ou reduzindo os custos de produção, onde as novas tecnologias devem possuir alta eficiência e baixo custo. Dentre as tecnologias disponíveis, as células de silício cristalino representam mais de 90% do mercado de células fotovoltaicas e são conhecidas como células de primeira geração. Já as de segunda geração são compostas por filmes inorgânicos como o disseleneto de cobre e índio (CIS) e na terceira geração é possível destacar as células baseadas em materiais orgânicos, pontos quânticos e as sensibilizadas por corante (ELY; SWART, 2014).

As células solares sensibilizadas por corante (do inglês: *dye sensitized solar cells* – DSSC), ou simplesmente células de Grätzel, surgiram na década de 90 e representam uma alternativa promissora para a produção de células solares de baixo custo. Na configuração clássica, as DSSC's podem atingir até 10% de eficiência, porém a partir de modificações nos componentes já foi possível alcançar eficiências de até 13% (SONAI *et al.*, 2015).

A caracterização da célula solar deve ser realizada em condições padrões de radiação definidas em normas internacionais, onde as células devem ser submetidas a fontes de luz de mesma intensidade que a radiação solar no nível do mar (1000 W/m^2) com um espectro semelhante ao AM1,5 e temperatura da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Essas normas garantem que todas as tecnologias sejam avaliadas da mesma forma e em condições próximas as reais de operação, possibilitando comparações de eficiência entre técnicas de fabricação, materiais e arquiteturas (WANG; LAUMERT, 2014).

Os equipamentos necessários para a caracterização de células solares em laboratório são o traçador de curva I-V e um simulador solar. O traçador de curva permite obter os parâmetros: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, e os pontos de tensão e corrente onde ocorre a máxima potência, os quais são utilizados no cálculo da eficiência da célula. E o simulador permite a simulação da radiação solar em condições padronizadas em ambiente interno, possibilitando a realização das análises em qualquer momento, sem a dependência das condições meteorológicas no ambiente externo.

No Laboratório de Materiais avançados (LMA) são sintetizadas moléculas orgânicas com potencial aplicação em sistemas fotovoltaicos e dispositivos de armazenamento de energia. Entretanto, as pesquisas ficam limitadas a síntese e ao estudo das propriedades químicas e físicas do material, não sendo possível a aplicação das novas moléculas nos dispositivos, principalmente, devido à dificuldade de acesso aos equipamentos necessários para a caracterização e obtenção dos parâmetros de desempenho das células.

Assim, motivado pelo potencial de aplicação das moléculas sintetizadas em células sensibilizadas por corantes e na possibilidade de realização das análises preliminares da aplicação do material nas células fotovoltaicas no próprio laboratório, neste trabalho foram desenvolvidos alguns dos principais equipamentos necessários para a avaliação preliminar das DSSC's utilizando materiais acessíveis e de baixo custo, como o Arduino Uno e lâmpadas de automóveis.

Os equipamentos produzidos foram empregados na avaliação de células solares sensibilizadas com corantes naturais que foram extraídos de frutas e legumes. As curvas I-V geradas foram utilizadas para avaliar o desempenho do traçador e sugerir melhorias para o sistema. Além disso, também foi construído um espectrômetro para avaliar a distribuição espectral do simulador na região da luz solar visível e possibilitar uma avaliação da proximidade do feixe de luz gerado com o espectro solar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver equipamentos de baixo custo que possibilitem a avaliação de desempenho de células solares sensibilizadas por corantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir um simulador solar para a avaliação do desempenho de DSSC's em condições próximas aos padrões definidos pela ABNT para testes de células fotovoltaicas;
- Construir um espectrômetro para avaliar a distribuição espectral da luz gerada pelo simulador em relação a radiação solar;
- Desenvolver um traçador de curvas de tensão e corrente para a caracterização elétrica das DSSC's;
- Aplicar corantes naturais extraídos a partir de frutas e legumes na sensibilização das células solares;
- Analisar os extratos por meio de Absorção na Região do Ultravioleta e Visível (UV-Vis);
- Associar os equipamentos desenvolvidos para avaliar o desempenho do sistema na obtenção da curva I-V das DSSC's construídas com os corantes naturais.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1 foi realizada uma introdução ao tema e especificado os objetivos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica contendo os principais conceitos e teorias abordados no seu desenvolvimento. Em seguida, no Capítulo 3 são apresentados os materiais e os métodos empregados para a construção dos equipamentos, bem como as considerações realizadas para a obtenção dos resultados, os quais são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 aborda as considerações finais contendo a conclusão e as perspectivas para o trabalho desenvolvido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta em suas seções as principais teorias utilizadas na fundamentação do trabalho, as quais são a base para a metodologia e discussão dos resultados.

2.1 ENERGIA SOLAR

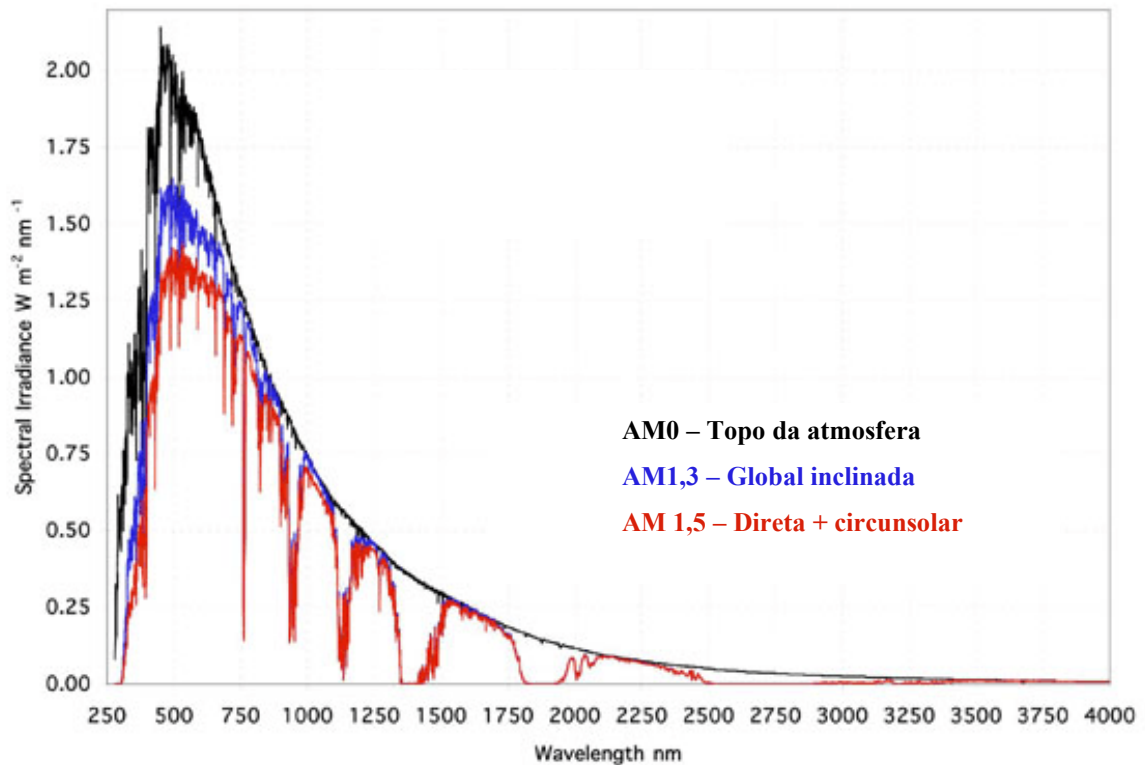
A energia solar é uma das principais fontes alternativas com potencial para suprir o aumento da demanda energética mundial. O aproveitamento dessa fonte de energia é realizado de formas naturais e artificiais. Na natureza destaca-se a fotossíntese, o ciclo hidrológico e os movimentos da atmosfera e oceanos, os quais são essenciais para a manutenção da vida no planeta. Dentre as formas de aproveitamento artificiais, ou seja, produzidos pelo desenvolvimento científico e tecnológico, destaca-se a conversão direta da energia solar em eletricidade por meio de equipamentos que funcionam com base no efeito fotovoltaico (PEREIRA *et al.*, 2017).

As características da radiação solar sofrem alterações ao percorrer a atmosfera terrestre, pois os elementos que a compõem causam efeitos de espalhamento e absorção. Tais alterações dependem da espessura da camada atmosférica, ou ainda, do coeficiente Massa de ar (AM), o qual depende do ângulo zenital do Sol, da distância Sol-Terra e das condições meteorológicas. A massa de ar ao nível do mar pode ser definida a partir da Equação (1), a qual é válida para ângulos zenitais (θ_z) entre 0° e 70° .

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (1)$$

Quando o Sol se encontra no zênite ($\theta_z = 0^\circ$) a massa do ar é igual a 1, sendo denominada de AM1, outras denominações são dadas, por exemplo, AM0 no topo da atmosfera, onde não existe massa de ar para a radiação atravessar. A Figura 1 apresenta o espectro da irradiância solar em três condições: Extraterrestre - no topo da atmosfera (AM0); Global Inclinada – ao atingir uma superfície inclinada em 37° em relação ao nível do mar e voltado para o Equador (AM1,3); e Direta – onde incide sobre uma superfície no nível do mar, após a radiação percorrer uma espessura 50% maior em relação aquela atravessada quando o Sol está no zênite (AM1,5) (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 1 - Distribuição espectral da irradiância solar em AM0, AM1,3 e AM1,5



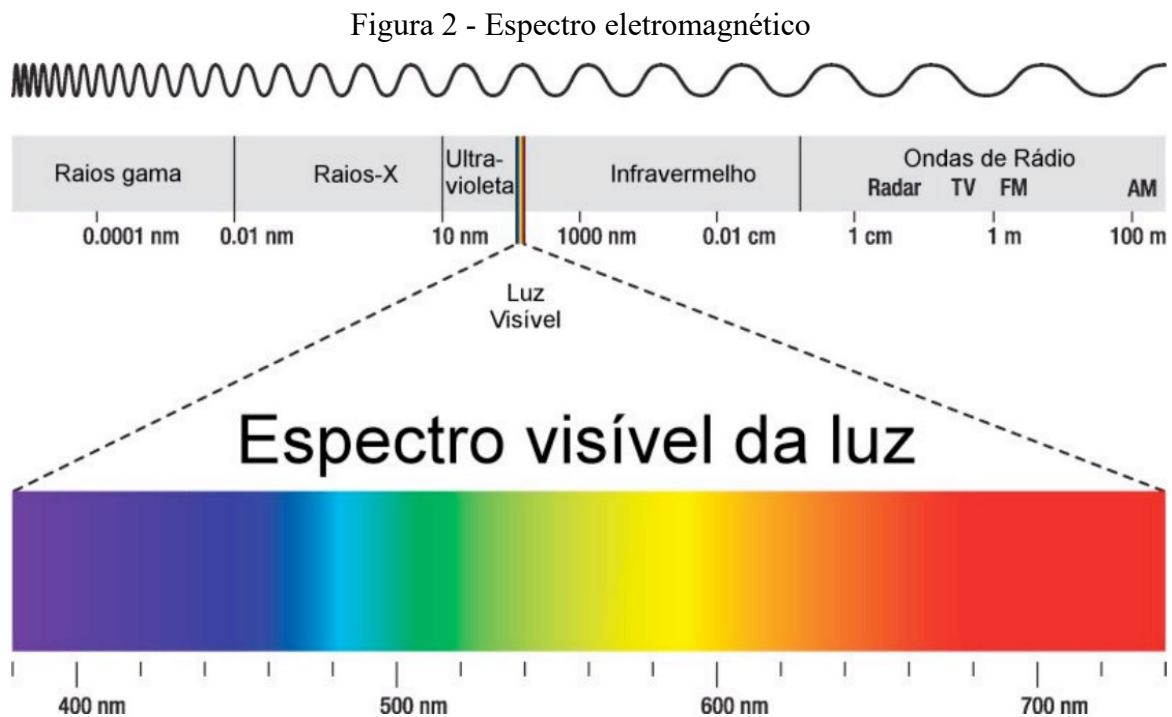
Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014) – Adaptado.

A densidade de energia média anual liberada pelo Sol medida sobre um plano perpendicular a propagação da radiação solar, no topo da atmosfera, é de 1367 W/m^2 . Na superfície, devido as alterações causadas pela atmosfera, a irradiância é de aproximadamente 1000 W/m^2 , onde cerca de 81% da energia que chega na Terra se encontra na faixa de comprimento de onda da luz visível e do infravermelho.

2.2 ESPECTROSCOPIA

A espectroscopia é um ramo da física que estuda a radiação absorvida, refletida, emitida ou espalhada por uma substância. Historicamente, o início da espectroscopia foi no século 17, quando Isaac Newton observou que a luz solar continha todo o espectro visível. No começo do século XIX, já era conhecida a radiação infravermelha e ultravioleta, de modo que o desenvolvimento de espectrômetros ópticos permitiu o registro de vários espectros, como o das cores de chamas e espectros de gases quando submetidos a descargas elétricas. Foram esses conhecimentos que possibilitaram o desenvolvimento da teoria atômica e o surgimento da mecânica quântica, a qual alterou os rumos da Física durante o século XX (SOLÉ; BAUSÁ; JAQUE, 2005).

O espectro eletromagnético é tradicionalmente dividido nas seguintes regiões espectrais: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios-X e raios- γ (Figura 2). Todas essas radiações se propagam pelo espaço como ondas eletromagnéticas transversais com velocidade aproximada de 3×10^8 m/s, onde a diferença entre as regiões espectrais é dada pela sua frequência ou comprimento de onda (CASTRO, 2017).



Fonte: (CASTRO, 2017).

O espectroscópio é um instrumento que possibilita a visualização da composição espectral de um objeto luminoso. Para isso, o espectroscópio utiliza elemento dispersivo, que pode ser um prisma ou uma rede de difração, os quais decompõem a luz que incide sobre uma fenda (GARCIA; KALINOWSKI, 2004).

O prisma possui a capacidade de separar as diversas cores porque o seu índice de refração é em função da frequência da luz incidente. Assim, a luz com diferentes frequências irá se propagar com diferentes velocidades dentro do prisma, o que resultará em diferentes desvios. Já na rede de difração, a difração ocorre quando uma onda contorna um ou mais obstáculos, mudando sua direção de propagação (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2002).

2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO

O Efeito Fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, os quais possuem uma banda de valência que permite a presença de elétrons, e uma banda de condução, que é completamente vazia. A separação entre essas bandas de energia é conhecida como banda proibida, *bandgap*, ou simplesmente *gap* (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre os materiais semicondutores, o mais comum é o Silício. Os átomos que compõem esse material possuem quatro elétrons que se ligam aos átomos vizinhos, de modo a formar uma rede cristalina. Quando um átomo que possui cinco elétrons é adicionado a rede cristalina, como o fósforo, existirá um elétron em excesso que ficará conectado fracamente ao átomo de origem. Isso faz com que uma pequena quantidade de energia térmica seja suficiente para tornar o elétron livre, e este, passe para a banda de condução. Nesta configuração, o fósforo atua como um doador de elétrons, e é denominado de agente dopante n ou impureza n (CRESESB, 2006).

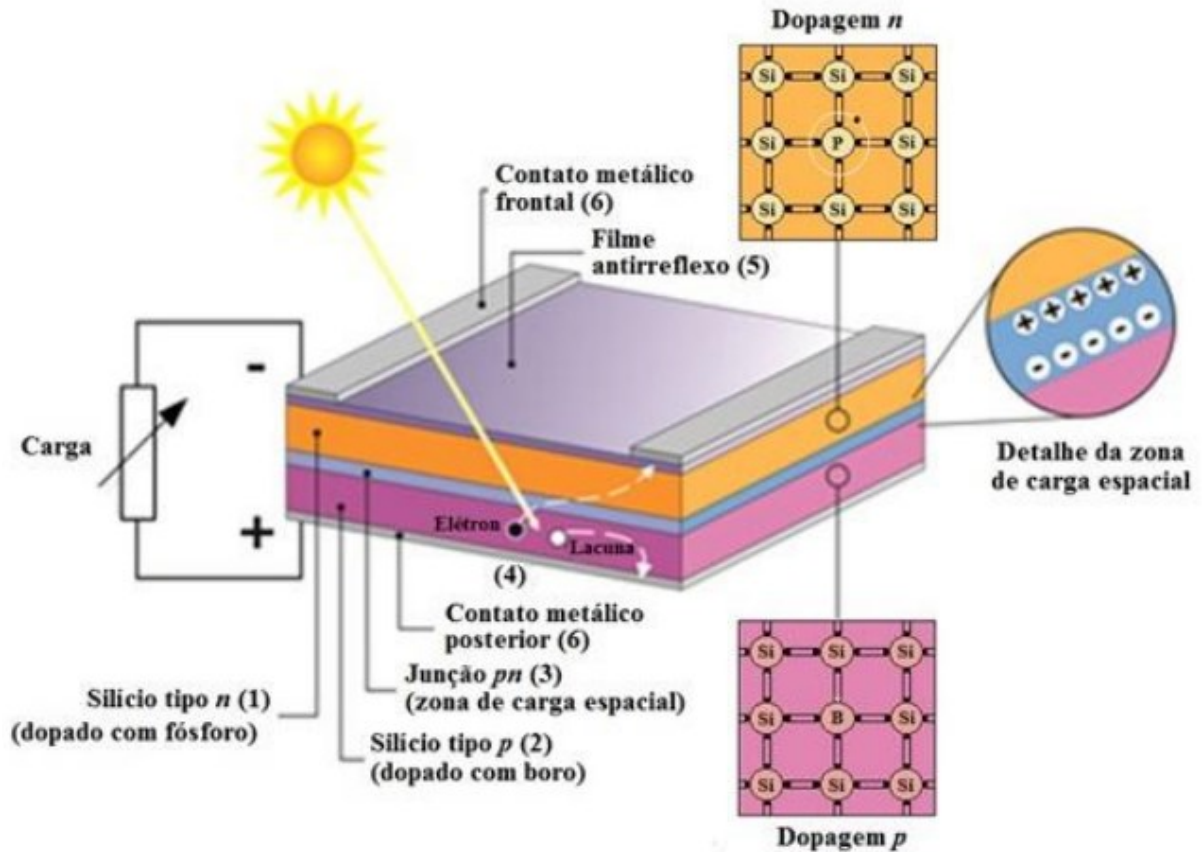
Em contrapartida, se o átomo inserido na rede cristalina possui apenas três elétrons, como é o caso do Boro, uma ligação não será realizada, de modo que haverá uma espécie de buraco ou lacuna. Com isso, uma pequena quantidade de energia térmica será capaz de transferir um elétron do sítio vizinho para a posição não ocupada, deslocando o buraco. Nesta configuração, o boro atua como aceitador de elétrons, ou ainda, um dopante do tipo p.

Quando esses dois materiais forem associados haverá a formação de uma junção p-n. Nesta junção, os elétrons livres presentes no lado n irão passar para o lado p, onde existem as lacunas. Em certo momento, haverá um acúmulo de elétrons no lado p, que passará a ter uma carga negativa. Por outro lado, haverá uma diminuição dos elétrons do lado n, o que o tornará eletricamente positivo. Então, as cargas acumuladas irão gerar um campo elétrico permanente que irá dificultar a transição dos elétrons do lado n para o lado p, este processo atinge um equilíbrio, até o momento em que não haverá a passagem de elétrons livres (CRESESB, 2006).

Quando a junção for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, haverá a geração de pares elétron-buraco, quando isto ocorre em locais onde o campo elétrico não é nulo, as cargas serão aceleradas e irão gerar uma corrente através da junção. O deslocamento de cargas ocasionado pelos fótons dá origem a uma diferença de potencial, a qual é denominada Efeito Fotovoltaico. Se as extremidades forem conectadas por um circuito externo, será possível a circulação de elétrons, gerando uma corrente elétrica (CRESESB, 2006). A Figura 3 ilustra a

configuração estrutural de uma junção p-n presente em uma célula fotovoltaica, apresentando de forma gráfica os processos descritos.

Figura 3 - Configuração estrutural de uma junção p-n em uma célula fotovoltaica



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são dispositivos que produzem energia elétrica a partir da energia proveniente dos fótons presentes na luz solar. O seu funcionamento é fundamentado no efeito fotovoltaico que ocorre em materiais semicondutores (AGNALDO *et al.*, 2006). Tais dispositivos possuem diferentes arquiteturas e podem ser construídos empregando diferentes materiais. Baseando-se no tempo de desenvolvimento da tecnologia e nos princípios de operação, esses dispositivos podem ser categorizados em células fotovoltaicas de primeira, segunda e terceira geração.

2.4.1 Primeira e segunda geração

A primeira geração é composta por células de silício monocristalino e policristalino, possui a maior participação no mercado mundial e as maiores eficiências de conversão (com exceção das células multicamadas), apresentando os preços mais baixos no mercado mundial. Tais células são baseadas em junções do tipo p-n de semicondutores, os quais são obtidos principalmente por meio de *wafers* de silício, atingindo eficiências de conversão de até 25% (SERPA, 2013). Entretanto, às células de primeira geração apresentam um limite máximo de conversão energética, onde a partir de princípios termodinâmicos, Shockley e Queisser demonstraram que a eficiência máxima para células solares de junção simples baseadas em silício é de 30% (TRACTZ *et al.*, 2020).

Já as células de segunda geração são baseadas em filmes finos de materiais como o silício amorfo, arsenieto de gálio, disseleneto de cobre-índio e cobre-índio-gálio e telureto de cádmio. Uma das vantagens do uso de filmes finos é a redução da quantidade de material para a produção, o que implica na redução dos custos de fabricação (SERPA, 2013). Entretanto, apesar dos custos terem reduzido nos últimos anos, não houve um crescimento significativo da participação dos filmes finos no mercado. Isso acontece, principalmente, devido a redução significativa dos custos dos módulos de primeira geração, aliado a sua maturidade no mercado e a boa eficiência de conversão (BÜHLER; GABE; SANTOS, 2019).

De modo geral, as células de segunda geração apresentam menor eficiência em relação as de primeira geração. Uma exceção são as células de arsenieto de gálio, também da segunda geração, que podem alcançar alta eficiência, porém seu custo de produção é elevado, de modo que são mais utilizadas em aplicações espaciais, principalmente como fonte de energia para satélites (SERPA, 2013).

2.4.2 Terceira geração

As células de terceira geração podem ser definidas como células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar em relação as células baseadas em um único *band-gap* eletrônico (ELY; SWART, 2014). Nessa geração, é possível destacar as células sensibilizadas por corantes (DSSC's - *dye sensitized solar cells*), as células de pontos quânticos (PQ's) e as células de perovskitas (TRACTZ *et al.*, 2020).

As células solares sensibilizadas por corante se baseiam no uso de um corante absorvedor que possui a capacidade de transferir um elétron, quando é excitado, para um

semicondutor (VITORETI *et al.*, 2017). Em 1991, Grätzel e O'Regan construíram uma célula sensibilizada por corante utilizando um filme semicondutor poroso de TiO₂ sensibilizado com corante baseado em rutênio, o qual alcançou 7% de eficiência de conversão (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991). Desde então, diversos materiais têm sido aplicados nesses dispositivos com o intuito de obter sistemas com maior eficiência.

A utilização de pontos quânticos em células solares foi desenvolvida, inicialmente, a partir da adaptação das DSSC's, substituindo o corante por pontos quânticos. Onde o uso de PQ's apresenta algumas vantagens como confinamento quântico e propriedades que variam de acordo com o tamanho das nanopartículas (VITORETI *et al.*, 2017). As células de pontos quânticos podem ser subdivididas em três grupos: metal-semicondutor, onde o efeito fotovoltaico ocorre entre o metal e os pontos quânticos; orgânicas híbridas, onde o efeito fotovoltaico ocorre na interface entre um polímero e os pontos quânticos, e as células sensibilizadas por pontos quânticos, onde o efeito fotovoltaico se dá na interface entre o semicondutor e os pontos quânticos (VITORETI *et al.*, 2017).

Quanto as células solares de perovskitas, estas têm se demonstrado muito promissoras no meio científico, pois com essa tecnologia foi possível alcançar uma eficiência de conversão de 20% em apenas meia década de estudos, entretanto a tecnologia ainda não está em escala comercial. De modo geral, as maiores eficiências são obtidas com perovskitas baseadas em haletos orgânico-inorgânicos (RAPHAEL *et al.*, 2018).

As células solares de terceira geração, de modo geral, ainda precisam superar dois grandes desafios para que se tornem competitivas no mercado da energia solar: a baixa eficiência e o baixo tempo de vida. A taxa de conversão da energia luminosa em elétrica das células dessa geração ainda é muito baixa. O índice máximo já obtido para células OPV foi de 12,1% e para a DSSC de 11,4%. Nas células feitas de silício cristalino a eficiência é de até 25%. Além disso, esses valores são referentes a células pequenas, com área de 1 a 2 cm², em painéis de maior área, a eficiência de conversão é reduzida. Entretanto, a terceira geração ainda possui um longo caminho de amadurecimento da tecnologia, o que pode ser impulsionado pelo desenvolvimento de novos materiais, semicondutores orgânicos, ou sistemas compósitos com nanomateriais (VASCONCELOS, 2013).

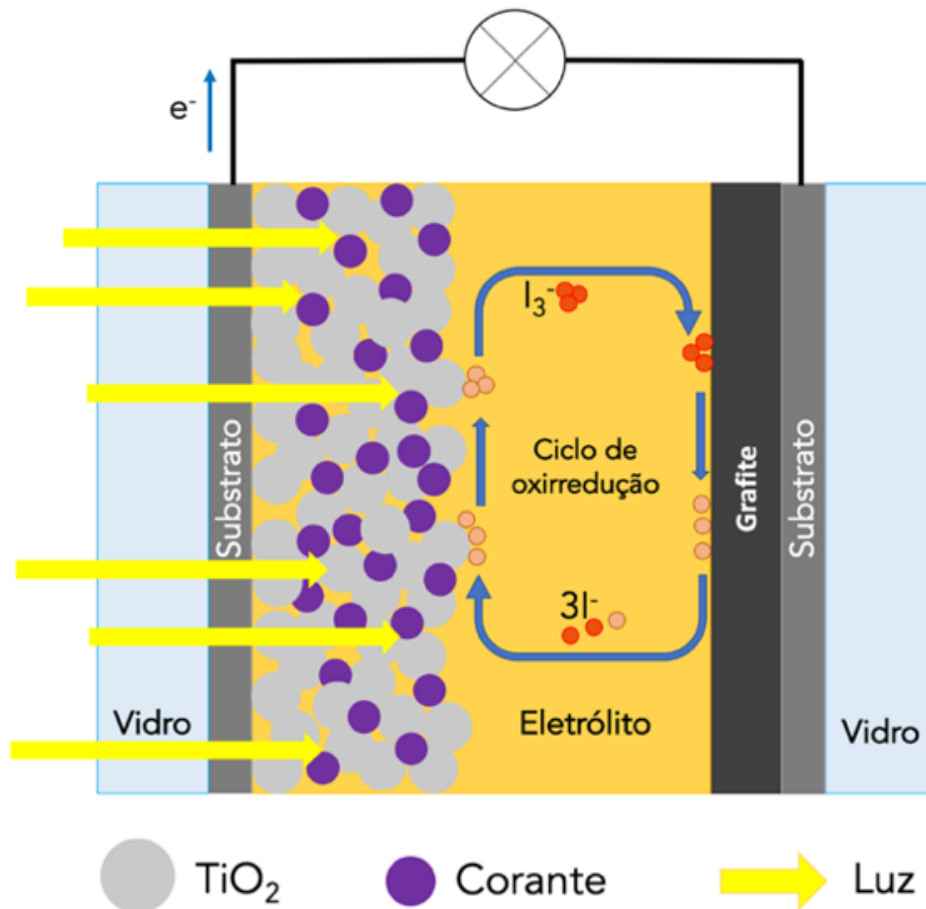
2.5 CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTES

De um modo geral, uma DSSC é composta por duas pequenas placas de vidro ou polímero, recobertas por um filme condutor transparente de óxido de índio e estanho (*ITO*).

Sobre o lado condutor da placa é depositada uma fina camada de nanopartículas de TiO_2 com 7-40 μm de espessura. O conjunto é submetido a um forno em alta temperatura onde o filme é sinterizado, adquirindo a configuração de semiconductor nanoporoso com grande área superficial, a qual é impregnada com um corante sensibilizador. A outra placa é revestida com uma fina camada de platina ou grafite sobre o lado condutor, compondo o contra eletrodo. As faces condutoras e semicondutoras são aproximadas e colocadas em contato por meio de um eletrólito, o qual normalmente é composto por íons de iodo (AGNALDO *et al.*, 2006).

O princípio de funcionamento de uma DSSC pode ser visualizado na Figura 4. O principal componente da célula é o óxido semiconductor (TiO_2), quando a radiação solar visível incide sobre a superfície do filme nanocristalino sensibilizado com o corante, faz com que este passe a um estado de excitação que resulta na injeção de um elétron na banda de condução do óxido. Os elétrons do corante são então regenerados através dos elétrons doados pelo eletrólito contendo um sistema redox, no caso, o par iodeto/triiodeto. A regeneração do sensibilizador pelo iodeto impede a recaptura do elétron da banda de condução pelo corante oxidado. O iodeto, por sua vez, é regenerado pela redução do triiodeto no contra eletrodo, sendo o circuito concluído com a migração dos elétrons através da carga externa. A tensão gerada quando a célula é exposta a uma fonte luminosa corresponde à diferença entre o nível de *Fermi* do elétron no sólido e o potencial redox do eletrólito. Idealmente, o dispositivo é capaz de gerar energia elétrica através da luz sem sofrer transformações químicas irreversíveis (GRÄTZEL, 2005).

Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma DSSC



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021) – Adaptado de Agnaldo *et al.*, 2006.

Uma desvantagem das DSSC's é a utilização de eletrólito líquido, o qual apresenta problemas de estabilidade em baixas temperaturas, onde o eletrólito pode congelar e causar danos físicos a estrutura da célula. Por outro lado, em altas temperaturas, pode haver a expansão do líquido, tornando a vedação das células um problema crítico. Assim, a solução eletrolítica deve ser cuidadosamente selada no interior do dispositivo, uma vez que pode ser perigosa à saúde humana e ao ambiente (ALVES, 2016).

A fabricação em larga escala e aplicações comerciais dessa célula ainda não se popularizaram, pois, associado aos problemas da dificuldade de vedação, também estão sendo verificados problemas de estabilidade química no eletrólito e degradação das células quando expostas à radiação ultravioleta ou calor (ALVES, 2016). A utilização de um eletrólito sólido polimérico é uma das formas de contornar esse problema e tem sido o objeto de estudos em trabalhos relacionados às DSSC's (MARCHEZI, 2015).

2.5.1 Dióxido de titânio

O TiO_2 é um óxido semicondutor que apresenta banda proibida larga ($\sim 3,2$ eV), não tóxico, anfótero, não inflamável, possui fotoestabilidade e apresenta baixo custo. Além disso, é um material poliamorfo, sendo encontrado com frequência na natureza em três formas cristalinas: broquita (ortorrômbica), anatase (tetragonal) e rutilo (tetragonal). As propriedades físicas e químicas variam de acordo com as fases, isso ocorre devido as diferenças nas células unitárias da estrutura cristalina, ou ainda, no grau de empacotamento em cada caso (VITORETI *et al.*, 2017).

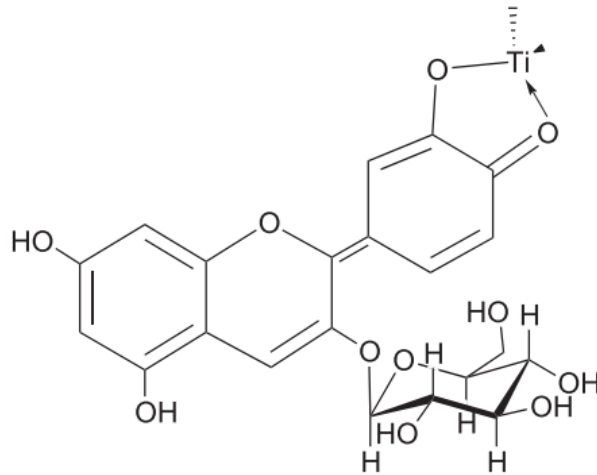
A fase anatase é a mais comum em aplicações em células solares, devido a sua dominância na formação de nanopartículas e ao maior tempo de recombinação elétron-buraco em relação a fase rutilo. A maioria dos métodos empregados no preparo do TiO_2 , produz a fase anatase e rutilo, ou uma mistura das duas. Assim, são as mais aplicadas e estudadas em processos fotovoltaicos. A aplicação do TiO_2 em células solares ocorre na forma de nanopartículas, o que possibilita uma grande área superficial, e em consequência, uma maior absorção de corante e maior contato do eletrodo com o eletrólito (VITORETI *et al.*, 2017).

O preparo dos eletrodos de TiO_2 para aplicação em DSSC's é feito através do preparo de uma pasta, a qual é depositada sobre um substrato condutor através de *screen-printing*. A espessura adequada da camada do TiO_2 está diretamente relacionada com a viscosidade da pasta e os aglutinantes utilizados no preparo. Após a deposição o eletrodo é submetido a um tratamento térmico ($T > 450$ °C), o qual é necessário para remover os resíduos orgânicos da pasta e sinterizar as nanopartículas (VITORETI *et al.*, 2017).

2.5.2 Corantes sensibilizadores

Para que um corante possa ser aplicado em DSSC's é necessário que na sua estrutura molecular existam grupos funcionais capazes de ancorar na superfície do TiO_2 , como as carboxilas e hidroxilas, as quais atuam favorecendo a injeção de elétrons na banda de condução do semicondutor. A ancoragem ocorre porque esses grupos funcionais são capazes de quelar aos sítios Ti^{IV} na superfície do dióxido de titânio (SMESTAD; GRÄTZEL, 1998). A Figura 5 exemplifica o processo descrito, onde é possível visualizar a cianidina-3-glicosídeo associada a superfície do TiO_2 , formando o complexo cianidina-3-glicosídeo- Ti^{IV} .

Figura 5 – Complexo cianidina-3-glicosídeo-Ti^{IV} formado pela absorção do corante pela superfície do TiO₂

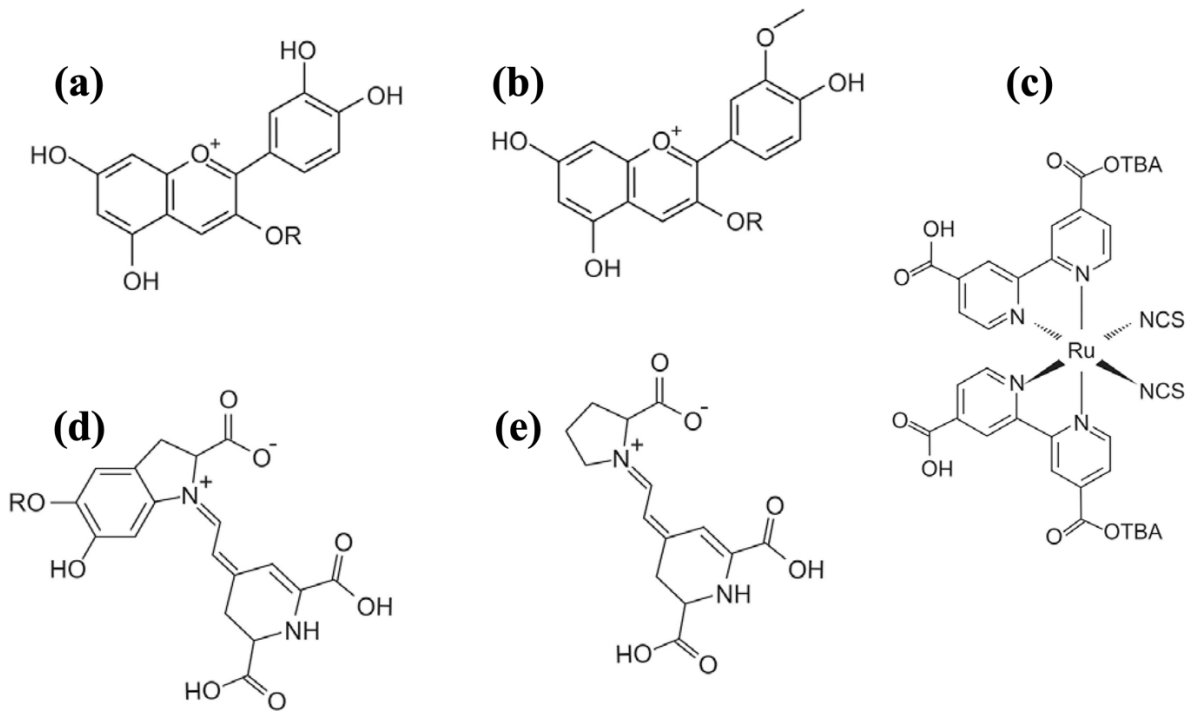


Fonte: (SMESTAD; GRÄTZEL, 1998).

As carboxilas (-COOH) são os grupos mais utilizados devido a sua eficiência na ancoragem, podendo ser encontradas em corantes naturais, como os derivados de betalainas, ou sintéticos, como o complexo metálico de Ru(II) denominado N719, um dos mais utilizados em DSSC's. As hidroxilas (-OH) também interagem com a superfície do TiO₂, porém as interações são mais fracas em relação a interação com as carboxilas. Dentre os corantes naturais que contém hidroxilas, destaca-se as antocianinas (SONAI *et al.*, 2015).

Na Figura 6(a) e (b) são apresentadas as estruturas moleculares das antocianinas presentes em frutas como *blueberry*, amora e a *pitaya*. Na Figura 6(c) é apresentado a estrutura do corante N719. As Figura 6(d) e (e) representam as estruturas das betalainas que podem ser encontradas no extrato da beterraba.

Figura 6 – Antocianinas: (a) cianidina-3-glicosídeo e (b) epeonidina-3-glicosídeo, R=glucose; (c) N719, TBA=Tetrabutylamônio; betalainas: (d) betacianinas e (e) betaxantina.

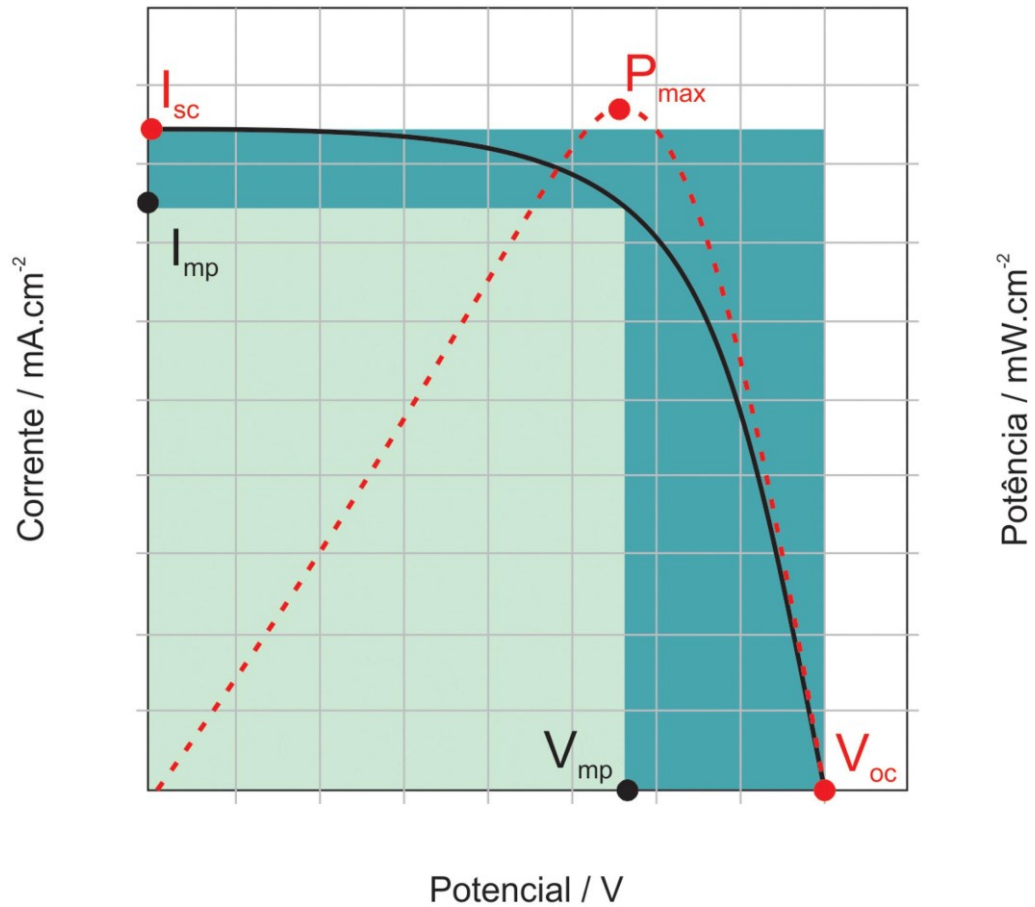


Fonte: (SONAI *et al.*, 2015) – Adaptado

2.6 CARACTERIZAÇÃO DE DSSC'S

O método mais utilizado para a caracterização de DSSC's consiste na obtenção da curva de densidade de corrente em função do potencial (J-V), a qual é realizada conectando uma carga variável e medindo a corrente e a tensão na célula de forma simultânea. Então os pares de tensão e corrente podem ser empregados na construção de um gráfico, obtendo como resultado uma curva semelhante à da Figura 7. Através dessa curva é possível obter os parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}).

Figura 7 - Curva J-V e P-V de uma célula solar fotovoltaica



Fonte: (SONAI *et al.*, 2015) - Adaptado.

A I_{sc} é a máxima corrente produzida por uma DSSC e é medida quando a tensão na célula é zero, podendo ser influenciada por fatores como o número de fótons incidentes, as propriedades óticas e a área da célula. A V_{oc} é o máximo potencial produzido quando não existe corrente no sistema, é dado pela diferença de potencial entre a banda de condução do óxido e o potencial redox do eletrólito (TRACTZ *et al.*, 2020).

Com os parâmetros I_{sc} e V_{oc} é possível calcular o fator de preenchimento ou fator de forma (FF) da célula, o qual é obtido através da Equação (2). Onde I_{mp} e V_{mp} são os valores de corrente e tensão cujo produto gera o ponto de máxima potência $P_{máx}$, o qual é obtido através da curva P-V (Figura 7).

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2)$$

O FF é um parâmetro que pode ser utilizado para verificar o quanto a curva real desvia da curva ideal ($FF = 1$). Este parâmetro também é importante para a determinação da

eficiência da célula (η), a qual é calculada a partir da Equação (3). Onde G_{in} representa a irradiação incidente (W/m^2) sobre a área A da célula solar (m^2) (SONAI *et al.*, 2015).

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{G_{in} A} \quad (3)$$

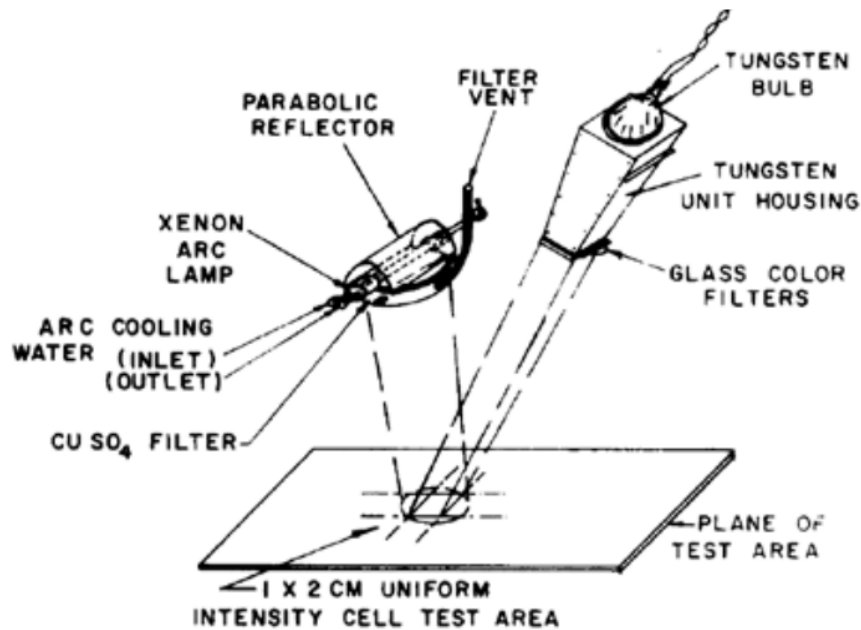
Para o processo de caracterização é importante que o valor da intensidade luminosa incidente seja conhecido, pois o aumento da intensidade luminosa pode induzir um aumento do número de elétrons sendo ejetados para a banda de condução do semicondutor, aumentando os valores de I_{sc} . Com base nisso, é necessário que a intensidade da irradiação utilizada para a caracterização seja padronizada, para isso são utilizadas fontes luminosas capazes de simular a radiação solar (TRACTZ *et al.*, 2020).

2.6.1 Simulador solar

Um simulador solar é um equipamento que permite reproduzir em laboratório as condições de iluminação da luz natural, onde os parâmetros mais importantes que precisam ser reproduzidos são a intensidade, o espectro, a uniformidade e a estabilidade temporal (VEISSID; VAZ, 2011).

A caracterização de células solares em ambiente de laboratório precisa ser conduzida utilizando condições padrões de teste, tendo como objetivo a reprodução da luz solar de forma padronizada, onde a densidade do fluxo energético deve ser $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, definido como o valor padrão de radiação de “1 Sol”. A distribuição espectral deve ser a mais próxima possível daquela onde o coeficiente de massa ar é de 1,5 (AM 1,5). Além disso, a temperatura da célula durante o teste deve ser de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (GEORGESCU; DAMACHE; GÎRȚU, 2008).

O simulador geralmente é composto por três itens principais: a fonte de luz e sua fonte de alimentação, filtros ópticos para modificar o feixe de luz e os controles necessários para a operação. As lâmpadas de xenônio normalmente são escolhidas como fontes de luz artificiais em simuladores, porém existem diferenças entre a fonte artificial e a luz solar, tanto em intensidade quanto em distribuição espectral. Assim torna-se necessário o emprego de filtros ópticos para modificar o aspecto da luz gerada artificialmente e o aproximar da luz natural (WANG; LAUMERT, 2014). Um exemplo de um dos primeiros simuladores solares, desenvolvido pela *Hoffman Electronics Corp*, é apresentado na Figura 8. Neste simulador, a fonte de luz é uma combinação de uma lâmpada de arco xenônio com uma lâmpada de tungstênio.

Figura 8 - Simulador solar da *Hoffman Electronics Corp*

Fonte: (WANG; LAUMERT, 2014).

As condições de teste devem seguir parâmetros internacionais, como os estabelecidos pelas normas IEC 904-9, JIS C 8912-1989 e ASMT E927-05. De modo geral, as três normas definem três classes de desempenho para um simulador solar, A, B e C. A classe A é o nível mais alto de certificação, onde os requisitos não variam de forma significativa entre as normas internacionais. A classificação depende da área de teste, uma área inferior a 30 cm x 30 cm é considerado um simulador de área pequena e as restrições impostas para esse sistema são mais rígidas em relação ao que possuem áreas maiores (GEORGESCU; DAMACHE; GÎRȚU, 2008).

No Brasil, a ABNT de 1991 estabelece os requisitos de desempenho de simuladores solares com base nos padrões internacionais (VEISSID; VAZ, 2011). A Tabela 1 apresenta as especificações necessárias para que seja possível classificar um simulador solar.

Tabela 1 - Classificação de um simulador solar de acordo com as suas especificações

Especificação	Classe A	Classe B	Classe C
Uniformidade da radiação	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Estabilidade temporal	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 40\%$	$\leq \pm 100\%$ e -60%

Fonte: (VEISSID; VAZ, 2011) - Adaptado.

Com relação às especificações apresentadas, a uniformidade garante que não haja pontos “quentes” que possam distorcer os resultados e a reprodutibilidade; a estabilidade

temporal específica qual a máxima flutuação possível na lâmpada para que não ocorram distorções na medida de eficiência da célula; o casamento espectral é importante porque garante que as condições de teste correspondem às condições reais (GEORGESCU; DAMACHE; GÎRȚU, 2008).

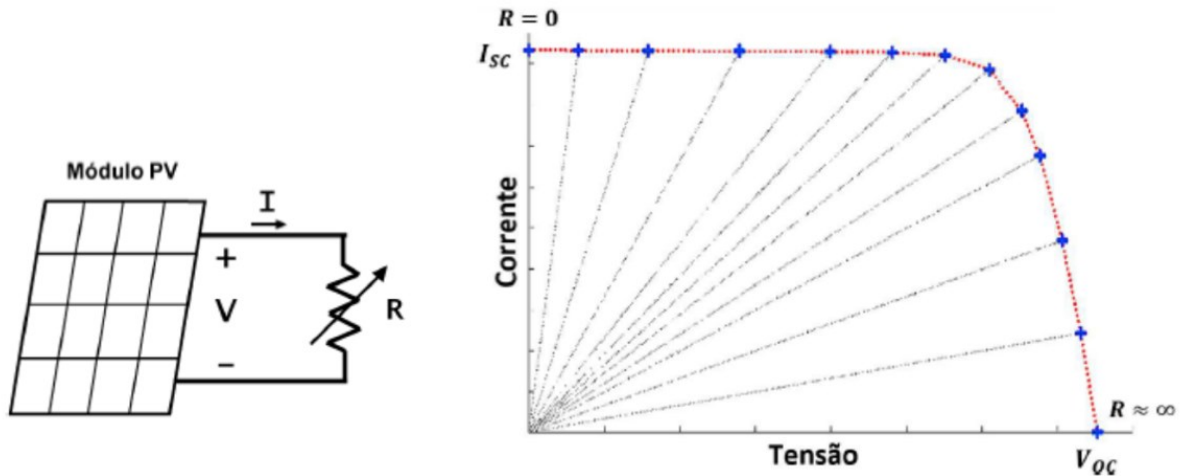
A padronização dos simuladores solares é importante para determinar o desempenho de uma série de amostras em uma única fonte, comparar as eficiências entre as diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, estudar a mudança do desempenho das células com o tempo (degradação) e fornecer dados de projeto para engenheiros e para a comercialização (WANG; LAUMERT, 2014).

2.6.2 Traçador de curvas I-V

A obtenção da curva I-V é realizada a partir de um equipamento que possui a capacidade de varrer todos os pontos da curva, de modo que seja possível verificar a corrente e tensão máximas e informar o ponto de máxima potência. Para que isso seja possível, uma carga variável deve ser conectada a célula e o dispositivo deve ser capaz de aferir a tensão e a corrente na célula enquanto a carga é variada gradativamente. Existem diferentes técnicas que permitem a realização dessa tarefa, as mais comuns são o uso de uma resistência variável ou uma de uma carga capacitiva (BRITO *et al.*, 2016).

Para células de baixa potência, a resistência variável pode ser um potenciômetro, onde a posição de menor resistência possibilita uma simulação de circuito aberto, e o aumento gradativo da resistência permite percorrer todos os pontos da célula, até a posição onde a resistência é muito grande, simulando uma condição de circuito aberto, onde é obtido a tensão de circuito aberto (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020). A Figura 9 ilustra o processo descrito.

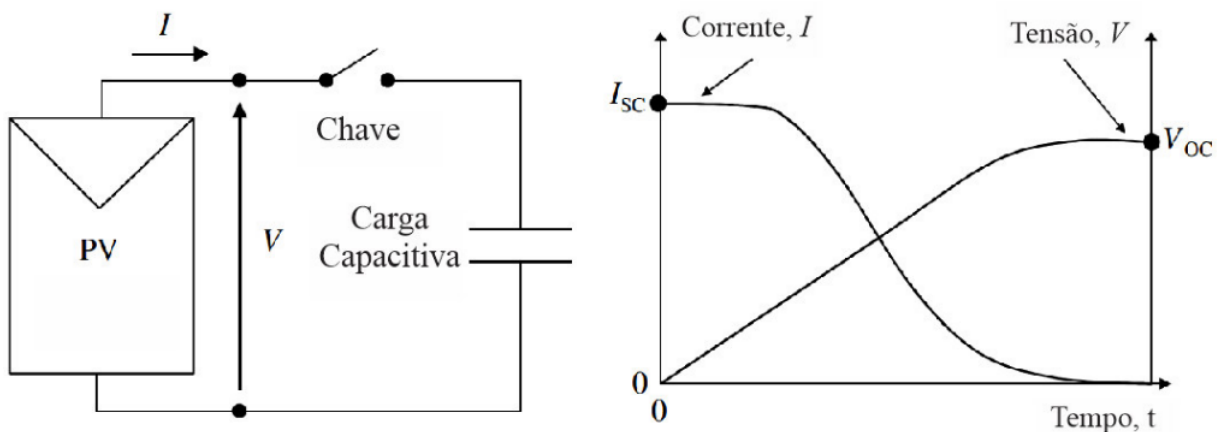
Figura 9 - Carga resistiva variável e curva I-V obtida a partir da carga resistiva variável



Fonte: (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020).

Já o emprego de carga capacitiva possui como princípio de funcionamento a utilização de um capacitor que é alimentado pela célula, sendo carregado até a tensão máxima. Durante o processo de carregamento o capacitor armazena energia e na medida que a carga aumenta são obtidos os pontos de tensão e corrente que são utilizados para traçar a curva (Figura 10). Após o processo de carga e obtenção da curva o capacitor é descarregado sobre uma resistência ou fechando um curto-circuito entre seus terminais para que seja possível iniciar outro teste (BRITO *et al.*, 2016).

Figura 10 - Esquema de ligação do painel com a carga capacitiva e evolução da tensão e corrente em função do tempo



Fonte: (BRITO *et al.*, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos aplicados no desenvolvimento dos equipamentos e na montagem das células solares sensibilizadas por corantes. Também são apresentadas as etapas de construção e as considerações realizadas para a obtenção dos resultados que serão discutidos no próximo capítulo.

3.1 SIMULADOR SOLAR

A construção do simulador solar foi baseada nos trabalhos desenvolvidos por Innocente e Boniatti (2020) e Geordescu *et al.*(2008), a abordagem empregada pelos autores foi distinta. O equipamento proposto por Innocente e Boniatti (2020) emprega uma fonte de luz composta por uma lâmpada de arco xenônio, um refletor parabólico e uma lente óptica do tipo plano convexa. O Simulador construído por Geordescu *et al.* (2008) propõem uma fonte de luz composta pela associação do feixe luminoso de duas lâmpadas, uma halógena e outra de xenônio, onde ambas possuem lentes condensadoras e filtros para a irradiação infravermelha e ultravioleta.

Assim como no simulador de Geordescu *et al.*(2008), o simulador solar apresentado nesse trabalho possui duas lâmpadas, as quais foram instaladas em uma estrutura baseada em placas de MDF, conforme proposto por Innocente e Boniatti (2020). A lâmpada de arco xenônio possui maior intensidade nos comprimentos de onda situados na região do azul e ultravioleta, enquanto a halógena possui maior intensidade nas regiões do vermelho e do infravermelho. Assim, o uso das duas lâmpadas permite uma melhor aproximação ao espectro ideal.

As lâmpadas foram adquiridas em conjunto com o reator (Figura 11), sendo um modelo “dois em um” empregado em faróis de automóveis, onde a lâmpada de xenônio é responsável pela luz baixa e a halógena pela luz alta. A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas dos itens adquiridos no conjunto.

Figura 11 - Soquete contendo as lâmpadas de xenônio e halogênio (a) ao lado do reator (b)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Tabela 2 – Especificações das lâmpadas e do reator

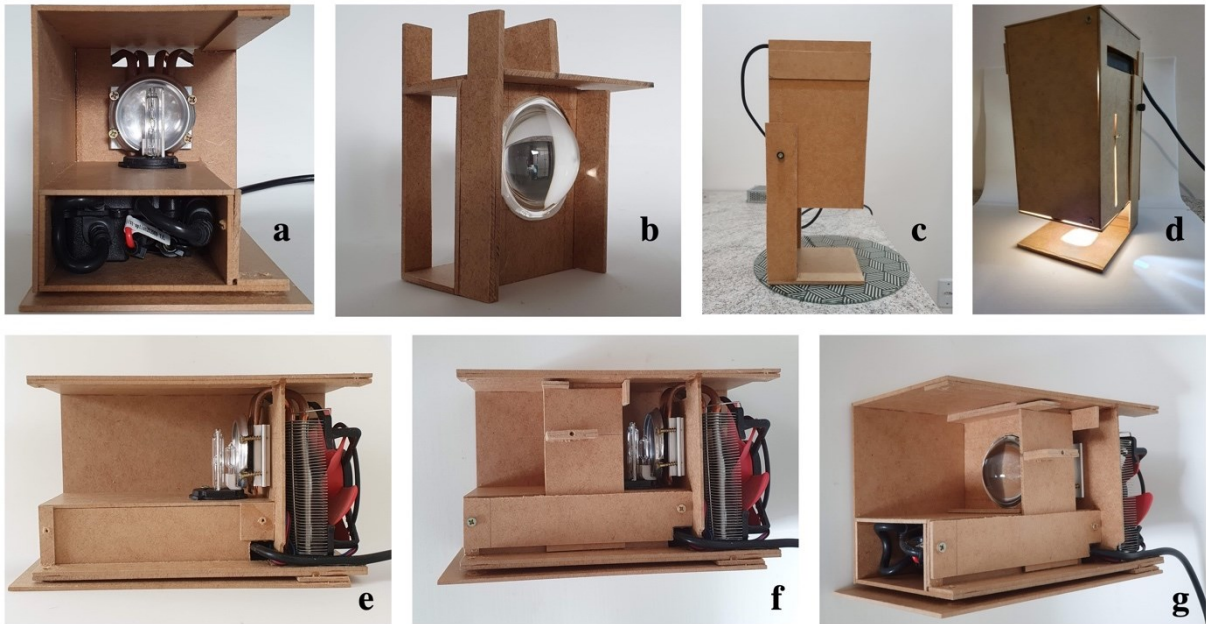
Item	Especificação	
Lâmpada de arco de xenônio	Modelo	H4-2
	Marca	First Option
	Temperatura de cor	6000 K
	Potência	35 W
	Tensão de trabalho	23 kV
Lâmpada de halogênio	Modelo	H4-2
	Marca	First Option
	Potência	55 W
	Tensão de trabalho	12.8 V
Reator	Modelo	HID BALLAST VK35WN
	Marca	First Option
	Frequência de saída	260 – 310 Hz
	Tensão de saída	23 kV
	Tensão de alimentação	9 – 16 V
	Corrente máxima (pico)	6.5 A

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A fonte de alimentação utilizada é da marca *C3 Plus*, modelo PS-200V4, sendo capaz de fornecer até 200 W de potência. Este modelo foi escolhido devido ao baixo custo e facilidade de obtenção, pois constitui-se de uma fonte genérica do tipo ATX empregada em computadores *Desktop*. A conexão do equipamento com a fonte de alimentação foi realizada por meio de uma extensão das saídas de tensão de 12 V, a extensão permitiu o posicionamento da fonte do lado externo, poupando espaço e permitindo um equipamento mais compacto.

A Figura 12 apresenta uma visão geral dos principais materiais e a configuração estrutural do dispositivo construído, onde é possível destacar o nicho das conexões elétricas (a), a lente (b), o suporte com ajuste de altura (c), o equipamento em funcionamento (d) e o sistema de ajuste de foco (e-g).

Figura 12 - Visão geral dos componentes e da construção do simulador solar



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Para obter um ponto focal com boa distribuição luminosa, foi empregado uma lente do tipo plano-convexa fixada sobre uma placa de posição regulável (Figura 12b), o que permite o ajuste do foco. Para direcionar o feixe de luz, foi construído um refletor parabólico a partir do fundo de uma lata de alumínio, que foi lixada e polida antes da montagem (Figura 12a). Para fins de suporte e remoção de calor, o refletor foi fixado sobre um dissipador com aletas de alumínio e *heat-pipes*, o qual possui um *cooler* que realiza a movimentação forçada do ar (Figura 12e).

O reator necessário para o acionamento da lâmpada de arco xenônio, os cabos e as conexões elétricas foram posicionados no interior do equipamento em um local específico, conforme pode ser observado na Figura 12a. Além de prover o espaço para os componentes citados, a estrutura também é utilizada como suporte para as lâmpadas e para a lente (Figura 12f). Na fonte de alimentação foram adicionados dois interruptores (fixados na estrutura metálica da fonte), que possibilitam o acionamento individual ou simultâneo das lâmpadas.

Após a montagem, o simulador solar foi calibrado utilizando o aplicativo *Photometer Pro*, o qual permite a medição da irradiância de uma fonte luminosa a partir do sensor de

luminosidade presente no *Smartphone*. Segundo os desenvolvedores do aplicativo, a luz solar possui aproximadamente 136000 lux, ou ainda 1075 W/m². Tal conversão é realizada pelo próprio aplicativo, que tem como saída o valor da irradiação em W/m².

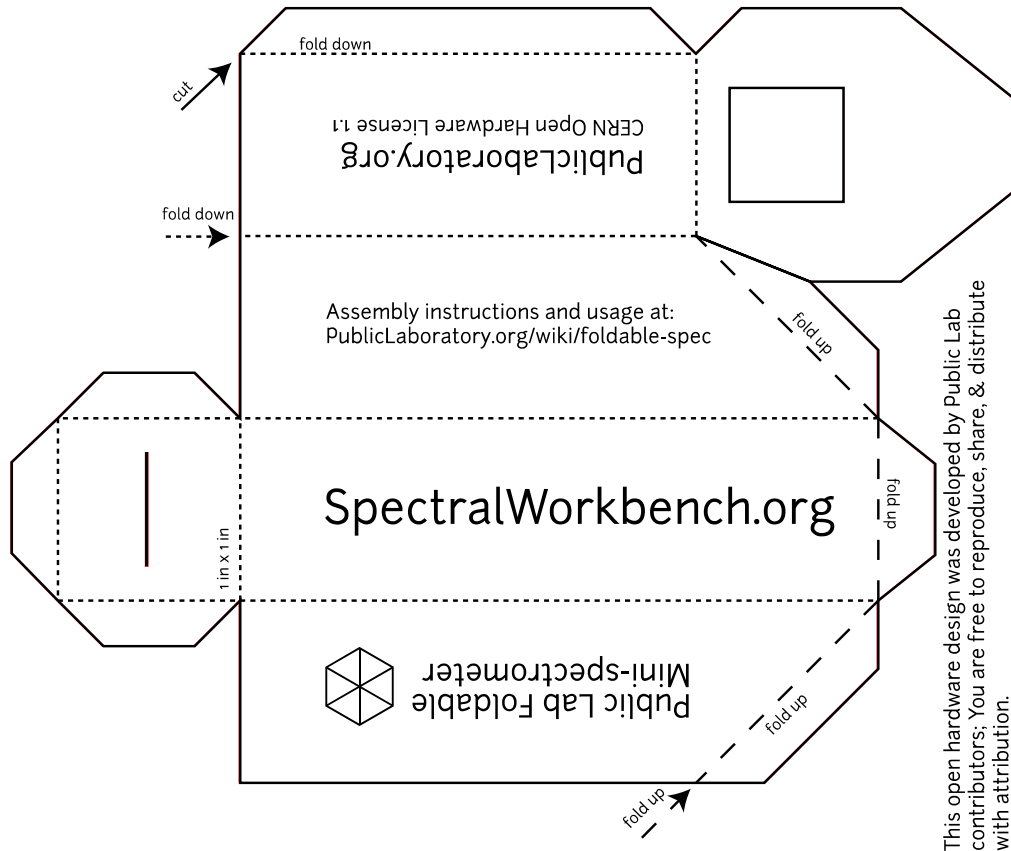
O aparelho utilizado para a calibração foi um Samsung *Galaxy S8 Plus*, o qual possui um sensor que permite a leitura da luminosidade em um intervalo de 0 a 500 mil lux. O uso do sensor do *smartphone* para a calibração do simulador solar foi fundamentado no trabalho publicado por Odenwald (2020), onde o autor conclui que os sensores de *smartphones* podem ser utilizados na obtenção de dados de qualidade razoável em comparação aos sistemas profissionais.

Além disso, foi realizado um estudo comparativo da distribuição espectral da luz do simulador em relação ao espectro da luz solar, o espectrômetro utilizado foi construído com os materiais e etapas descritas na próxima seção.

3.2 ESPECTRÔMETRO

O espectrofotômetro foi elaborado utilizando o modelo disponibilizado pela plataforma online *Public Lab*. O conhecimento, tecnologia e dados compartilhados nesse site são criados pela comunidade e são de código aberto. Na plataforma, existe uma série de projetos de equipamentos que podem ser construídos de forma simples e gratuita, dentre eles, o projeto utilizado para a construção do espectrômetro, o qual é apresentado na Figura 13. O modelo pode ser impresso com as cores invertidas para gerar linhas brancas em um fundo preto, ou de modo convencional em fundo branco. Entretanto, para um bom desempenho, a parte interna deve ser preta.

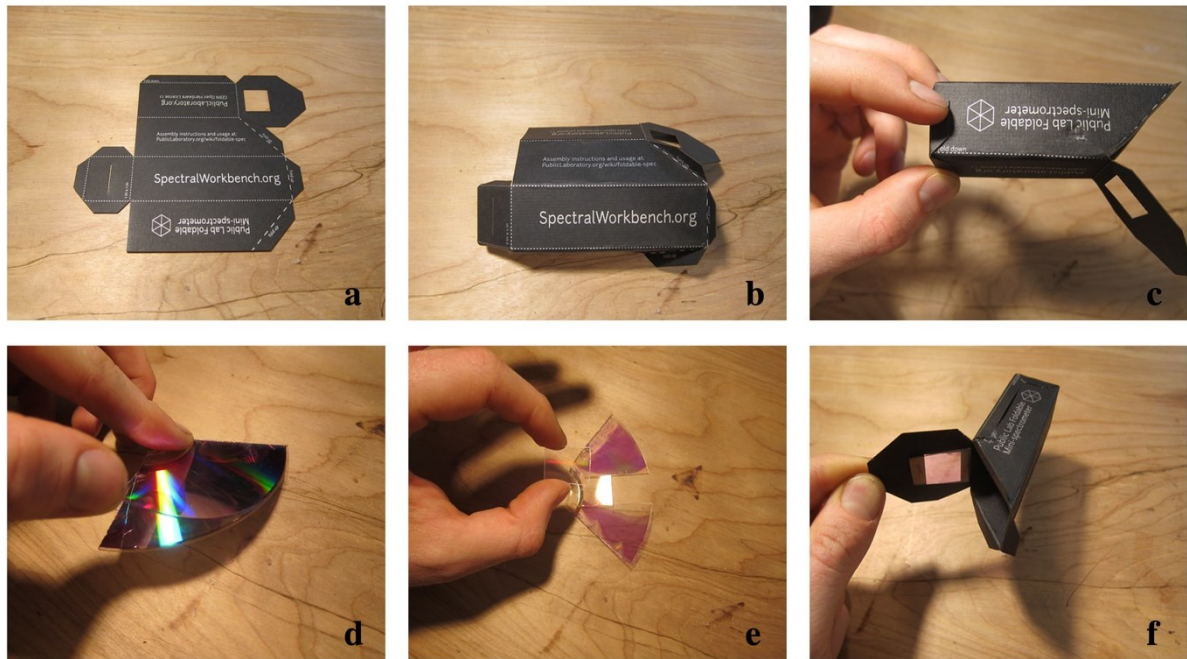
Figura 13 - Modelo recortável do espectrômetro



Fonte: PublicLab (2016).

A Figura 14 apresenta as instruções para montagem do equipamento. Neste trabalho a impressão foi realizada em papel branco, o qual foi colado sobre papel cartão preto. Feito isso, o modelo foi recortado (a), dobrado nas linhas pontilhadas (b) e colado (c). É importante que as abas fiquem do lado externo, pois assim conseguem bloquear de forma mais efetiva a entrada de luz. A grade de difração foi obtida através de um disco de *DVD-R*. Para isso, o disco foi cortado em quatro partes (d), o que permitiu a separação das camadas que compõem o disco, onde a camada transparente é a grade de difração. Em seguida, foi realizado o corte de um quadrado de aproximadamente 2 cm x 1,5 cm (e). A grade de difração obtida foi colada no interior do espectrômetro utilizando fita adesiva (f). O posicionamento correto é aquele onde a grade de difração fica na vertical, produzindo um arco-íris espectral na horizontal (f).

Figura 14 - Etapas de montagem do espectrômetro



Fonte: PublicLab (2016) - Adaptado.

Após a montagem da estrutura contendo a rede de difração, o conjunto foi fixado com fita isolante sobre a lente de uma câmera USB da marca Logitech, modelo C270 com resolução de 1280x720 pixels. Na Figura 15 é possível visualizar o espectrômetro finalizado. A fita preta foi colada para reduzir o tamanho da fenda, o que permite espectros de boa qualidade em fontes luminosas de alta intensidade.

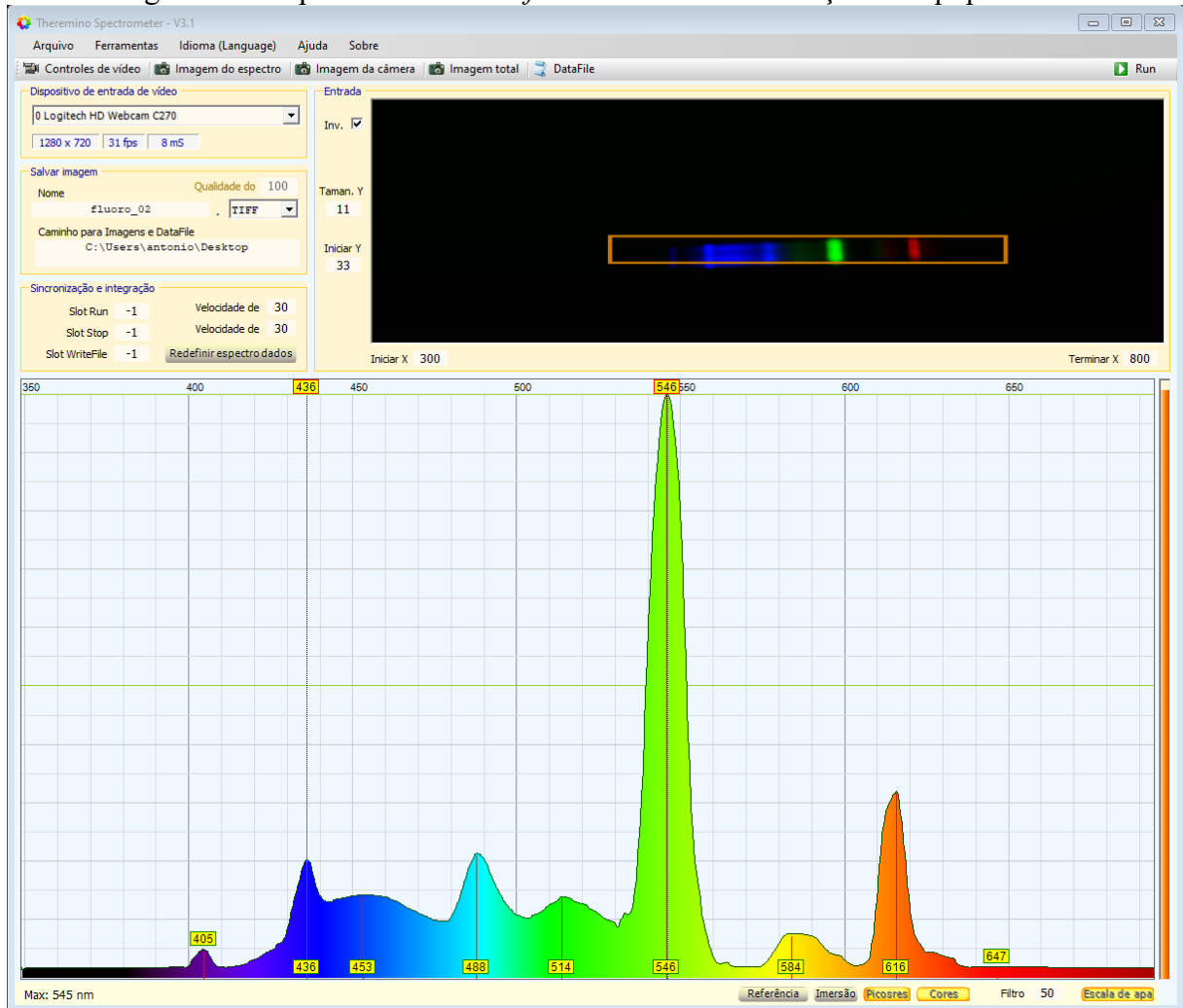
Figura 15 – Espectrômetro



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O processamento das imagens espectrais geradas pelo espectrômetro foi realizado através do software *Theremino Spectrometer* (versão 3.1) o qual faz parte de um conjunto de ferramentas de código aberto disponibilizadas online de forma gratuita através do projeto *Theremino*. A Figura 16 apresenta uma captura de tela do software sendo executado no *Windows 10*, sistema operacional da *Microsoft*.

Figura 16 - Captura de tela do *software* durante a calibração do equipamento



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O *software* utiliza a imagem gerada pela câmera (em tempo real) para calcular a intensidade da luz que atinge cada pixel, sendo capaz de avaliar a radiação para cada cor. A calibração do equipamento foi realizada utilizando uma lâmpada fluorescente, pois estas apresentam um espectro muito característico marcado pela presença de duas faixas no espectro que são produzidas pelo mercúrio.

As linhas possuem comprimento de onda conhecido, sendo uma azul de comprimento de onda 436 nm e outra verde de comprimento de onda de 546 nm. Tais linhas

são precisas e não variam de posição, permitindo a calibração do equipamento. A qual é executada movendo a linha pontilhada do gráfico até os picos relativos aos comprimentos de onda de 436 e 546 nm. O gráfico na parte inferior da Figura 16 apresenta a distribuição espectral em relação aos comprimentos de onda citados, os quais são identificados com uma etiqueta amarela na parte superior.

Assim que foi definido a referência de comprimentos de onda com o auxílio da lâmpada fluorescente, o espectrômetro pôde ser utilizado para analisar a distribuição espectral da luz do Sol e das lâmpadas que compõem e simulador. Para personalização e comparação de resultados, os dados obtidos foram salvos em arquivo de texto e importados para o *Microsoft Excel*.

3.3 TRAÇADOR DE CURVA I-V

O traçador de curva I-V foi construído com base no trabalho publicado por Rezky *et al.* (2018) onde é proposto um equipamento de baixo custo para caracterização de células solares de baixa potência baseadas em silício. Na publicação, os autores utilizam um Arduino Nano com um microcontrolador ATmega328p associado a um módulo de leitura de corrente e tensão modelo INA219. Um resistor variável foi utilizado como carga, e os dados de tensão e corrente adquiridos durante o teste são exibidos em um display OLED e armazenados em um módulo contendo um cartão de memória.

Neste trabalho, o traçador I-V utilizou um Arduino UNO que possui o mesmo microcontrolador empregado por Rezky *et al.* (2018). Porém, os dados não foram armazenados no dispositivo, sendo enviados para o computador via porta USB e exibidos na interface serial da IDE do Arduino. Ao final do teste, os dados são copiados e inseridos em um arquivo de texto que é importado para o *Microsoft Excel*, onde é gerado o gráfico a partir dos pontos de tensão e corrente aferidos.

O Arduino é uma plataforma de *hardware open source* que possui fácil utilização e é ideal para aplicações que envolvem interação com o ambiente por meio de sensores. A plataforma emprega uma camada simples de software implementada na placa, no caso, um *bootloader* e uma interface amigável que utiliza uma linguagem baseada em C/C++. No ambiente de programação, são disponibilizadas várias bibliotecas que permitem o interfaceamento com outros *hardwares*, permitindo o desenvolvimento de aplicações simples ou complexas em qualquer área (SOUZA *et al.*, 2011).

O Arduino UNO é uma placa microcontrolada baseada no microcontrolador ATmega328p (Figura 17). Possui 14 pinos de entrada e saída digitais, 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico e 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP e um botão de reinicialização, os quais compõem os itens a interface necessária para dar suporte ao microcontrolador.

Figura 17 – Imagem ilustrando a placa do Arduino UNO



Entradas Analógicas

Fonte: (SOUZA, 2013).

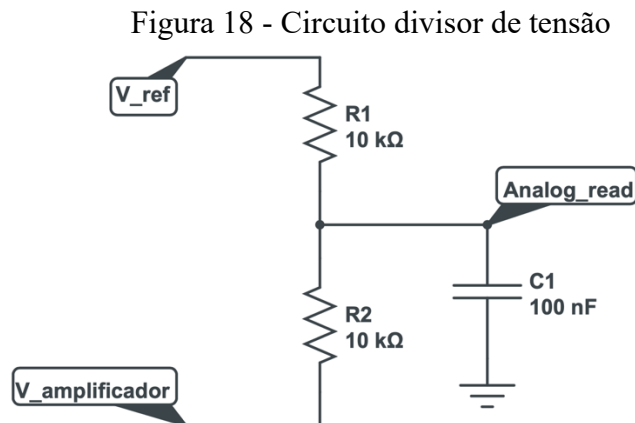
As portas analógicas do Arduino podem ser utilizadas para realizar a leitura de tensão, onde o dispositivo atua como um multímetro. Tais portas possuem um conversor analógico-digital de 10 bits, o que permite o mapeamento de tensões entre zero e a tensão de referência (normalmente é a tensão de alimentação) para valores inteiros entre 0 e 1023. Assim, se a tensão de referência é 5 V, a resolução de leitura será de 5 V dividido pelo intervalo de 1024 que é igual a 4.9 mV por unidade. Para aumentar a resolução, basta reduzir a tensão de referência, porém, a tensão que se deseja medir não pode ultrapassar a referência (SOUZA, 2013).

As DSSC's construídas em laboratório normalmente possuem uma área pequena, o que facilita a montagem do dispositivo. Entretanto, em consequência da área reduzida, a corrente gerada é muito baixa, podendo ser menor que 0,1 mA. Assim, o módulo INA219 deixa de ser uma opção, pois este dispositivo possui uma resolução mínima de 0,1 mA, valores menores que isso serão indicados como 0 ou 0,1 mA.

A alternativa mais simples encontrada foi a utilização de um circuito amplificador, o qual normalmente é associado a osciloscópios e multímetros para possibilitar a leitura de correntes da ordem de μA e nA . O funcionamento do circuito é baseado em um amplificador operacional modelo LMC6482, que amplifica o sinal de corrente e o converte em um sinal de tensão. Onde, uma leitura de 1 mV na saída do circuito equivale a uma corrente de 1 μA . Assim, o microcontrolador faz a leitura da corrente de forma indireta por meio da tensão lida no circuito amplificador.

A leitura das tensões é realizada nas portas analógicas do Arduino, as quais utilizam a referência de tensão interna do microcontrolador que é de 1,1 V, permitindo uma resolução de leitura de aproximadamente 1 mV. Entretanto, as portas analógicas permitem apenas a leitura de tensões positivas, e na configuração de circuito utilizada, a saída de tensão do amplificador é invertida. Assim, para que a leitura pudesse ser realizada, foi implementado um circuito divisor de tensão que atua como uma interface Arduino-amplificador.

O divisor é composto por dois resistores de mesma resistência, os quais foram associados de acordo com a Figura 18. Nessa configuração, o valor lido pela porta analógica ($Analog_{read}$) será positivo e pode ser convertido para o valor de tensão de entrada ($V_{amplificador}$) com o uso da Equação (4), a qual foi utilizada no código de programação do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

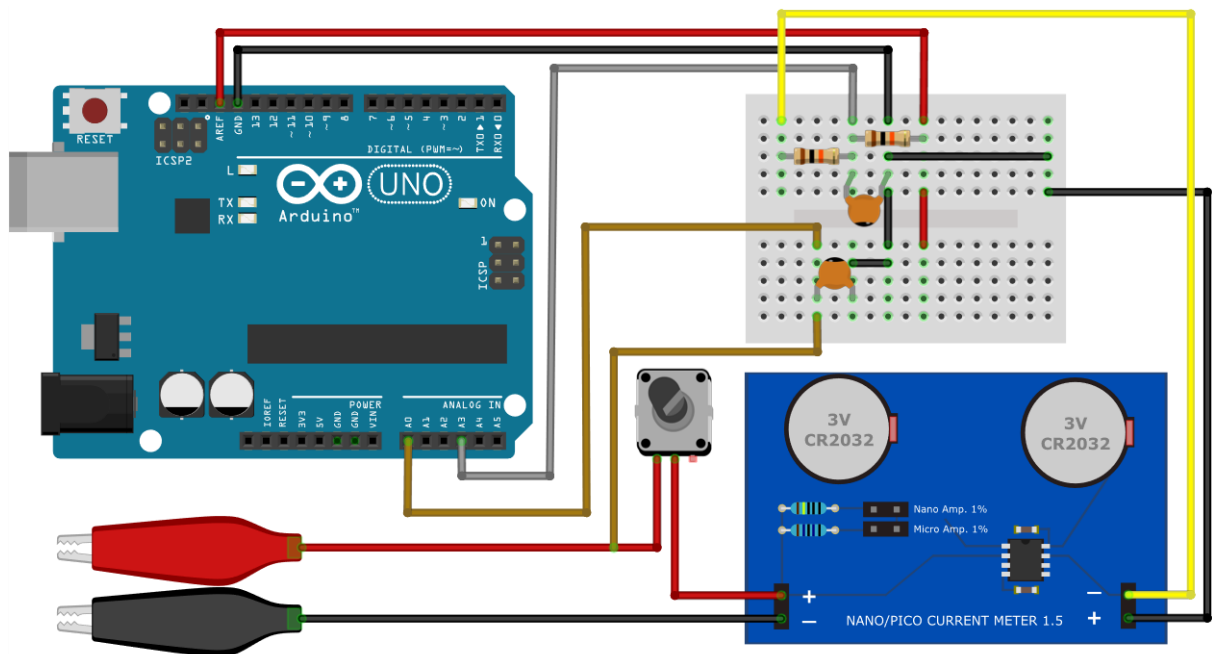
$$V_{amplificador} = V_{referência} \left(\frac{Analog_{read}}{512} - 1 \right); \quad (Analog_{read} \in \mathbb{Z} | 0 \leq Analog_{read} \leq 1023) \quad (4)$$

O equipamento foi configurado para utilizar um potenciômetro de 100 k Ω como carga variável (10 k Ω /volta). Porém, também é possível a utilização de uma carga capacitiva. No caso, um capacitor eletrolítico de 220 μF , o qual possui uma chave em paralelo que permite o seu descarregamento antes da obtenção dos dados. Além disso, dois capacitores

cerâmicos de 100 nF foram conectados de forma paralela aos pinos de leitura e o GND, onde atuam como um filtro, reduzindo e estabilizando o ruído de tensão nas entradas analógicas.

Na Figura 19 é possível visualizar os componentes descritos e as suas conexões elétricas. As garras vermelha e preta são utilizadas para conectar o equipamento aos terminais positivo e negativo da célula solar. O sistema é alimentado através do mesmo cabo USB utilizado para a conexão de dados. A placa contendo o amplificador operacional necessita de duas baterias de 3 V do tipo CR2032, que são necessárias para fornecer a alimentação e as referências de tensão ao amplificador.

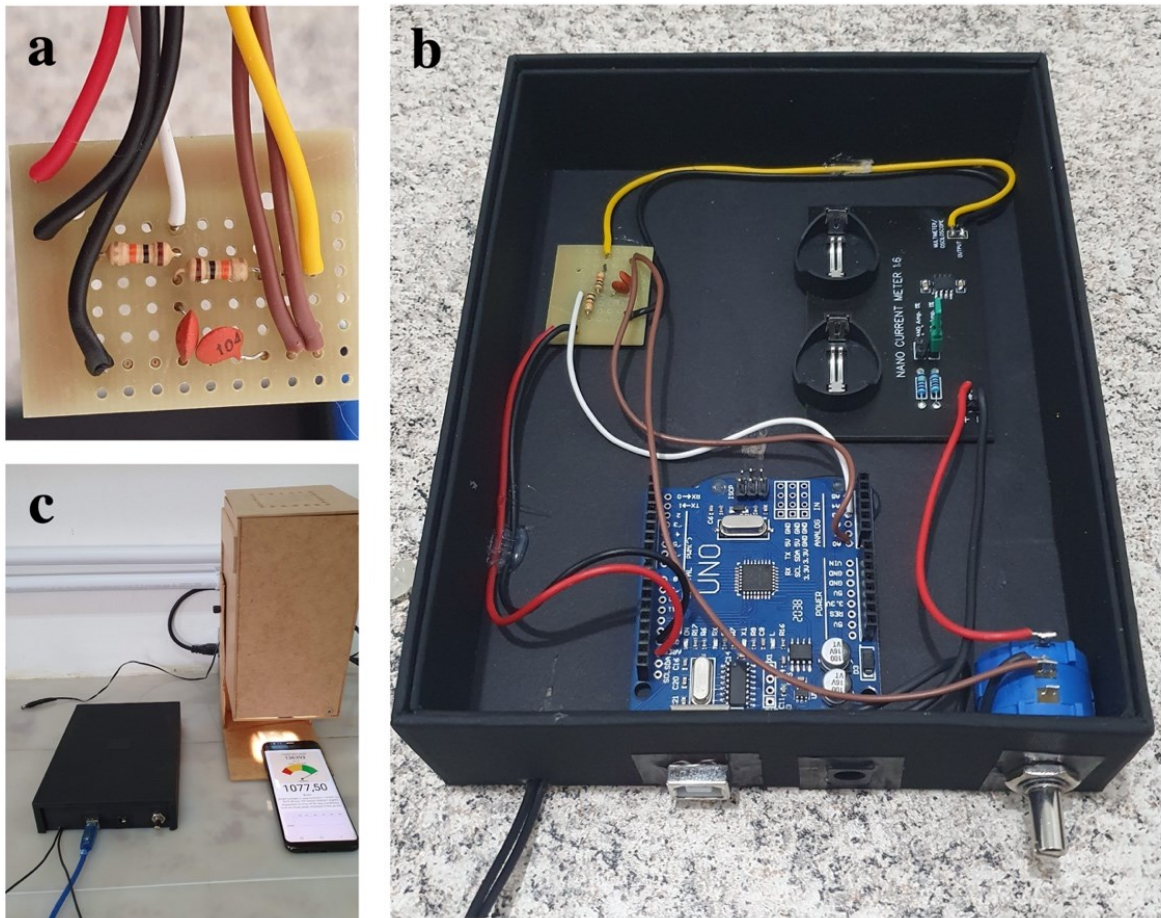
Figura 19 - Protótipo do traçador I-V



Fonte: Elaborado pelo Autor por meio do *Software Fritzing* (2021).

Após a fase de prototipagem, os componentes foram conectados de forma definitiva por meio de pontos de solda e instalados dentro de uma caixa de papelão com tampa. A Figura 20 apresenta o circuito contendo as conexões (a), a disposição interna dos componentes na caixa (b) e o equipamento finalizado ao lado do simulador solar (c).

Figura 20 – Disposição dos componentes e traçador I-V finalizado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A obtenção do valor de tensão e corrente é realizada por meio da leitura dos valores nas portas analógicas A0 e A3 do Arduino. A porta A0 realiza a leitura da tensão da célula solar, enquanto a porta A3 realiza a leitura da tensão do circuito amplificador, que é convertido para o valor de corrente. Para obter resultados mais suaves, são realizadas 60 leituras em cada porta, as quais são armazenadas e somadas, onde o valor final da tensão é a média dos valores obtidos.

O número de leituras para a realização da média foi obtido empiricamente, onde foram testados diferentes valores visando a obtenção de uma curva suave, porém sem a alteração do seu formato, com pontos bem distribuídos. Foram testados os seguintes números de leitura: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 100 e 200, dentre esses, 60 leituras se demonstraram ideais, ao passo em que resultaram em uma curva suave com tempo de leitura razoável, valores maiores que isso não apresentaram diferenças significativas, apenas consumindo mais tempo e recursos do microcontrolador.

De acordo com o projeto do Arduino, cada leitura é realizada em 100 μ s. Assim, as sessenta leituras duram cerca de 6 ms. O processo descrito é realizado para as portas A0 e A3, o resultado da média é contabilizado e enviado para o monitor serial em intervalos de 50 ms, ou seja, a cada 50 ms o programa retorna a média dos valores lidos em pares tensão e corrente, o que resulta em aproximadamente 20 pontos de tensão e corrente por segundo.

3.4 MONTAGEM DAS CÉLULAS SOLARES

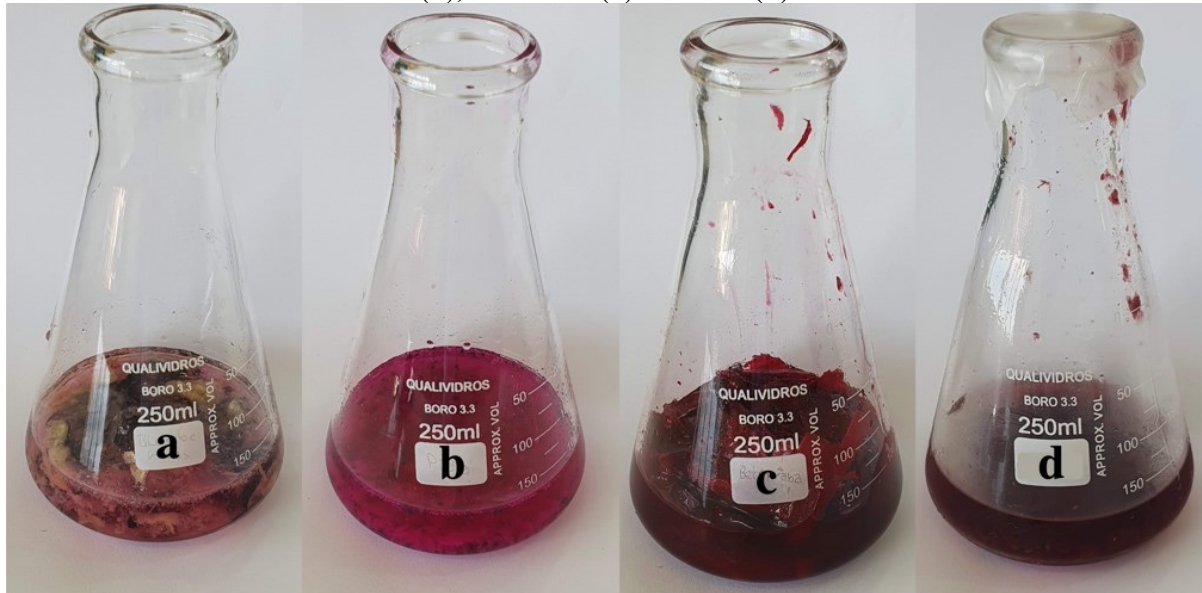
O preparo dos componentes para a montagem de uma célula solar sensibilizada por corante exige uma série de etapas, as quais são descritas detalhadamente nas seções a seguir.

3.4.1 Extração dos corantes naturais

Os corantes empregados na sensibilização das células solares foram extraídos de frutas e legumes. Dentre as opções disponíveis no mercado local, foram selecionados a beterraba, a amora, o *blueberry* e a *pitaya*, as quais foram adquiridas e mantidas em ambiente refrigerado até o momento da extração. A metodologia empregada foi baseada no trabalho desenvolvido por Tonial e Silva (2008), os quais utilizam etanol como solvente de extração.

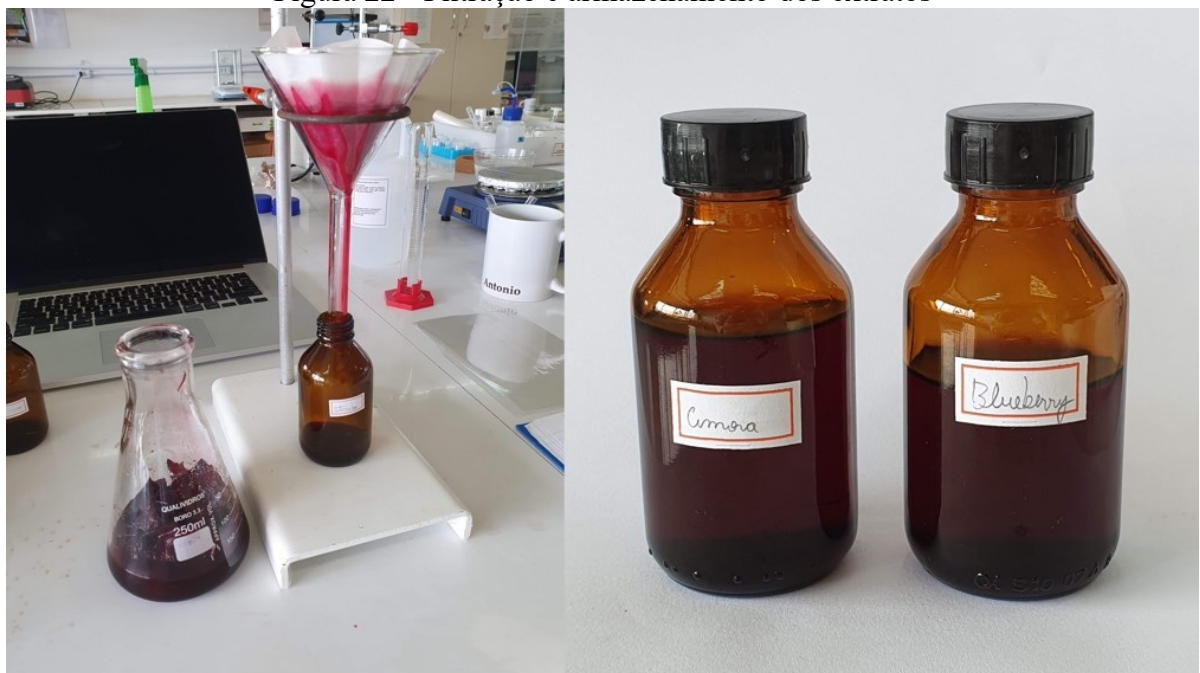
Para o processo de extração, as frutas foram lavadas com água e maceradas, a beterraba foi lavada e ralada. Então, 50 g de cada fruta/legume foram inseridos em *erlenmeyers* de 250 mL seguidos da adição de 100 mL de etanol. Os *erlenmeyers* foram fechados com *parafilm*, cobertos com papel alumínio (para evitar possíveis reações de fotodegradação) e mantidos na geladeira por 24h. A Figura 21 apresenta os extratos de *blueberry* (a), *pitaya* (b), beterraba (c) e amora (d) após o tempo de extração. Em seguida, os extratos foram filtrados, armazenados em frascos de cor âmbar (Figura 22) e guardados no congelador.

Figura 21 - Extratos dos corantes naturais das seguintes frutas/verduras: *blueberry* (a), *pitaya* (b), beterraba (c) e amora (d)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

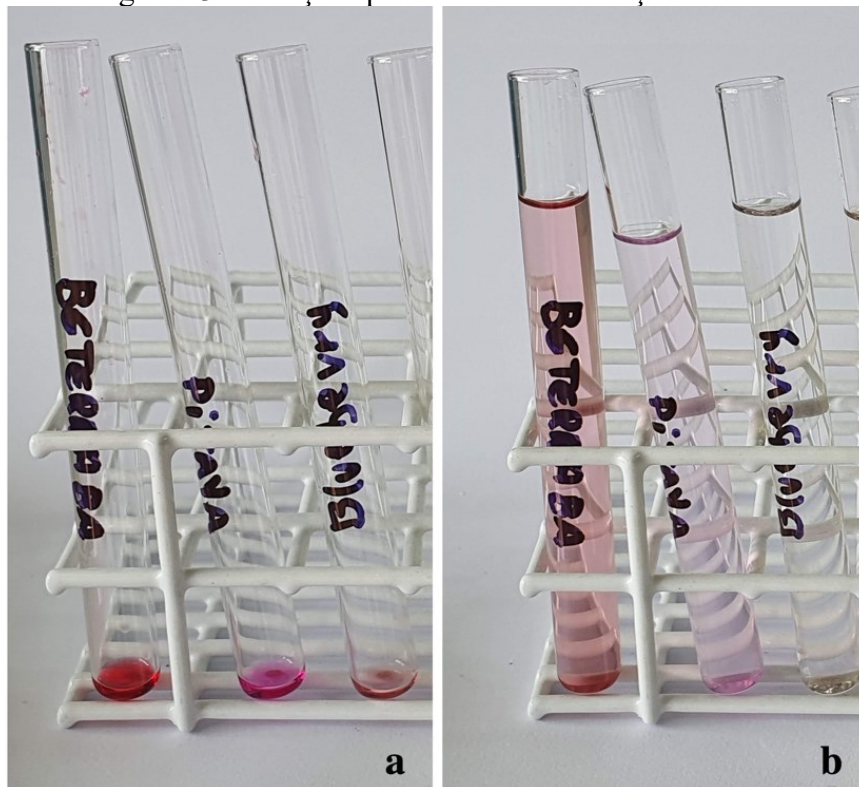
Figura 22 - Filtração e armazenamento dos extratos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As amostras dos extratos foram submetidas a análise de absorção em um espectrofotômetro de UV-Vis automático com faixa de 190 a 1100 nm e largura de banda de 2 nm da marca Even. As amostras a serem analisadas foram adicionadas em tubos de ensaio (Figura 23a) e dissolvidas com etanol na proporção de 1:10 (Figura 23b). A dissolução foi necessária para que a absorvância não excedesse o limite de operação do equipamento.

Figura 23 - Soluções para análise de absorção UV-Vis



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

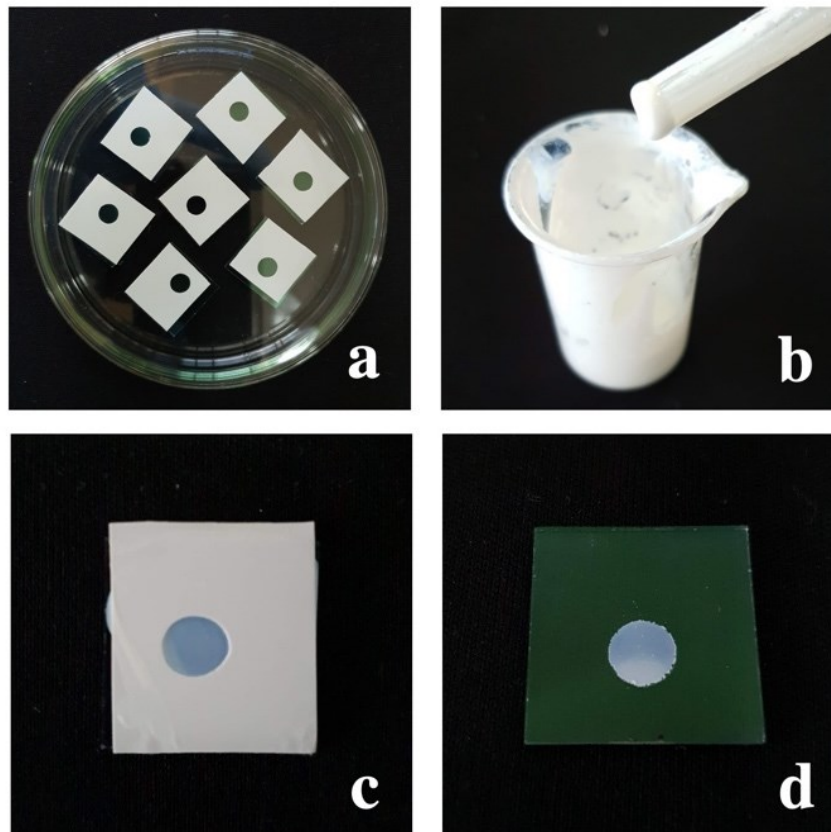
3.4.2 Preparo do eletrodo de TiO₂

O processo inicial para a montagem do eletrodo foi o preparo da pasta de TiO₂ com base na metodologia proposta por Feitosa *et al.* (2016), onde são utilizados 3,0 g de TiO₂, 10 mL de etanol e 0,15 mL de *Triton X-100* (surfactante). Neste trabalho, a proporção dos componentes é a mesma, porém a quantidade utilizada foi menor e o agente surfactante foi substituído por detergente neutro. Assim, foi utilizado 1,0 g de TiO₂ nanoparticulado (Degussa P25), 3,3 mL de etanol e 0,05 mL de detergente neutro. Os quais foram inseridos em um béquer e submetidos a agitação ultrassônica por 30 min, a pasta obtida apresentada na Figura 24b.

Os substratos de vidro condutor ITO de dimensões 20 mm x 20 mm foram lavados com água deionizada e detergente neutro, submersos em acetona e ultrassonificados por 10 min para a remoção de possíveis contaminantes na superfície. Após esse processo, os substratos foram submersos em etanol e ultrassonificados por mais 10 min para remoção da acetona do processo anterior. Sendo acondicionados em uma placa de Petri que foi previamente limpa, também com acetona e etanol, para evitar contaminação superficial.

A deposição da pasta sobre o substrato condutor foi realizada através da técnica *doctor blading*, a qual foi conduzida utilizando uma máscara adesiva que foi obtida com um perfurador de papel e fita isolante branca. A máscara foi colada sobre a superfície condutora do substrato (Figura 24a), e em seguida, uma alíquota da pasta de TiO_2 foi adicionada sobre a máscara e espalhada com um bastão de vidro, preenchendo toda a superfície da área perfurada (Figura 24c). Após a evaporação do solvente, a máscara foi removida (Figura 24d) e o processo foi repetido mais seis vezes em novos substratos de vidro com ITO, resultando em sete eletrodos.

Figura 24 - Etapas de preparo do eletrodo de TiO_2



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A sinterização do TiO_2 depositado sobre os substratos foi realizada em uma chapa de aquecimento, onde os eletrodos foram posicionados diretamente sobre a chapa, a qual foi coberta com um cadinho de porcelana. Nessa configuração, o cadinho possibilita a retenção de calor, agindo como uma espécie de forno. Os substratos foram mantidos nesse sistema na temperatura máxima da chapa de $350\text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min. A Figura 25 apresenta os substratos antes e após o processo descrito.

Figura 25 - Substratos com TiO₂ antes (a) e depois da sinterização(b)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

3.4.3 Sensibilização dos eletrodos

Após o processo de deposição e sinterização, foi realizado a sensibilização dos eletrodos. Para isso, os substratos foram imersos em béqueres contendo os extratos com os corantes naturais (Figura 26), os quais foram mantidos em repouso um ambiente protegido da luz durante 3 h. Nesse período, os corantes são absorvidos pela superfície do TiO₂. Em seguida, os eletrodos foram lavados com etanol para remoção do excesso de corante e acomodados em uma placa de Petri até o momento da montagem da célula.

Figura 26 - Sensibilização das DSSC's por meio de submersão nos estratos de *pitaya*, *beterraba*, *blueberry* e *amora*



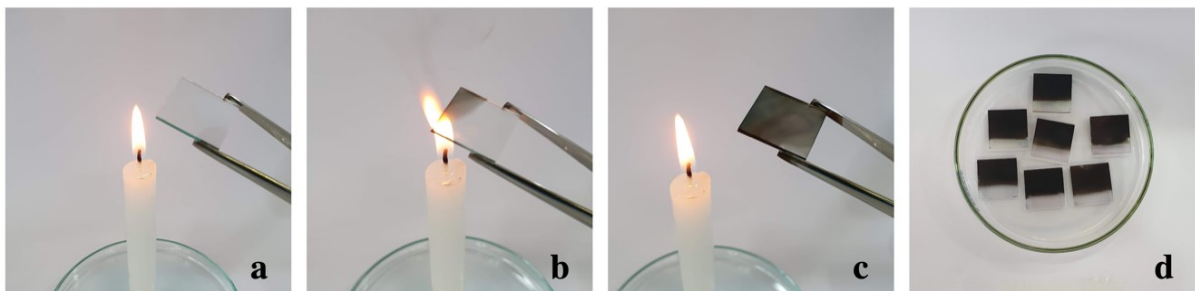
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

3.4.4 Preparo do contra eletrodo

O preparo do contra eletrodo foi baseado no trabalho de Christ *et al.* (2019), onde substrato de vidro condutor foi lavado com água deionizada e detergente neutro, seguido de ultrassonificação em acetona e etanol. Após o processo de limpeza, o carbono elementar foi depositado sobre a superfície condutora utilizando a fuligem gerada pela combustão incompleta da parafina em uma vela.

A Figura 27 permite uma visualização do processo de deposição, o qual consiste em aproximar (a) e afastar o substrato da chama (b) várias vezes até que toda a superfície seja coberta com fuligem (c). Uma haste com algodão na ponta foi utilizada para remover uma faixa estreita da deposição para indicar a área onde será realizado o contato elétrico com o circuito externo (d).

Figura 27 - Deposição de carbono sobre os substratos (a-c) e eletrodos após a deposição (d)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

3.4.5 Eletrólito

O eletrólito utilizado para a montagem da célula solar foi obtido misturando uma solução de 1 M de iodeto de potássio (KI) com outra solução de 0,1 M de iodo (I_2), ambas em etileno glicol, a proporção da mistura foi de 1:1. A Figura 28 apresenta uma amostra da solução eletrolítica após o preparo.

Figura 28 – Imagem da solução eletrolítica armazenada em um *ependorf*

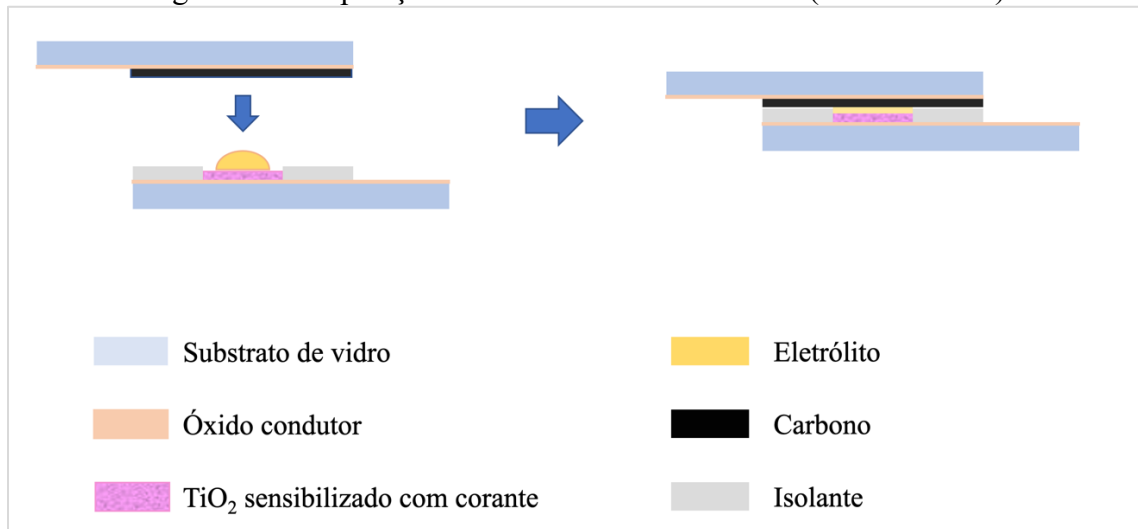


Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

3.4.6 Montagem das células

A montagem da célula solar consiste na junção do eletrodo de TiO_2 com o contra eletrodo em uma espécie de “sanduíche” contendo o eletrólito em seu interior, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Disposição das camadas da célula solar (fora de escala)



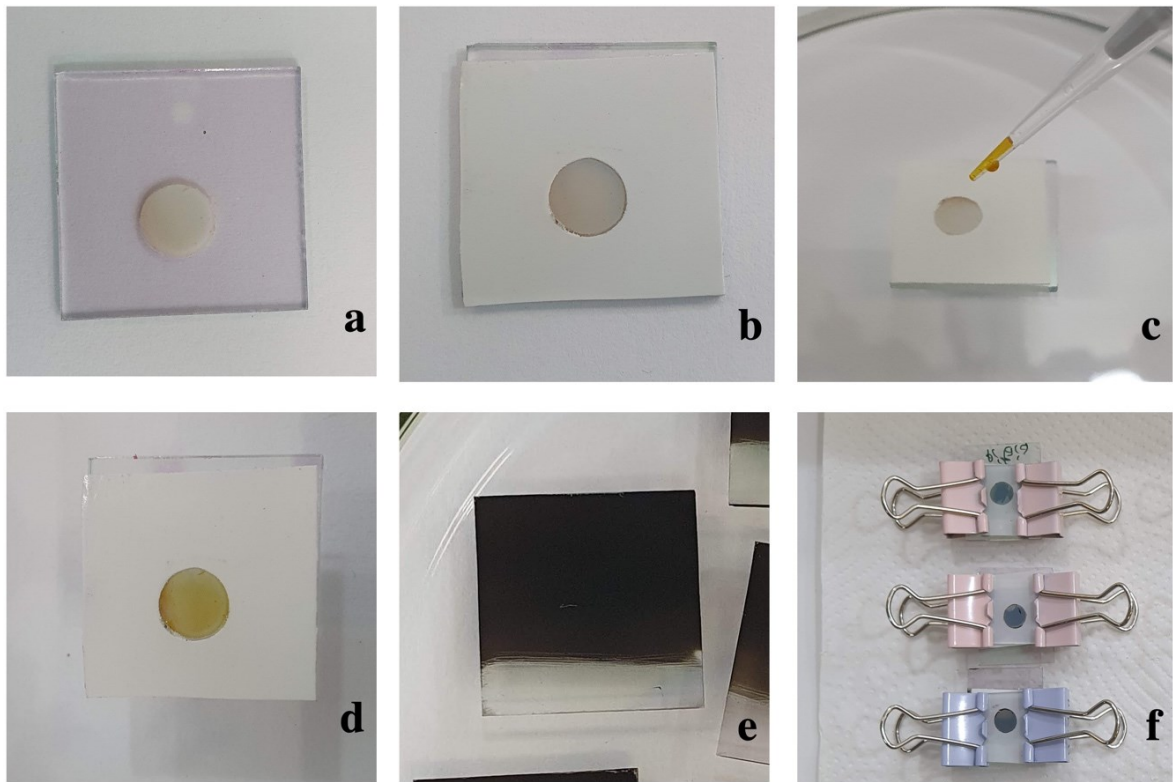
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Uma etapa importante no processo de montagem é a proteção dos substratos para que não ocorra curto-circuito na célula. Assim, foi preparado um espaçador isolante com o mesmo método aplicado na fabricação da máscara de deposição, utilizando fita isolante branca e um perfurador de papel. O isolante obtido foi colado sobre a superfície do eletrodo contendo o TiO_2 , de modo a cobrir a superfície do substrato, com exceção da área contendo a deposição.

A Figura 30 mostra os componentes e as etapas de montagem da célula, onde é possível destacar o eletrodo de TiO_2 (a), o posicionamento do isolante (b), a inserção de $5 \mu\text{L}$ do eletrólito sobre a superfície ativa com uma micropipeta (c-d), o contra eletrodo contendo a deposição de carbono, e por fim, a célula após a montagem (f).

O eletrodo de carbono foi colocado cuidadosamente sobre o isolante para evitar que a deposição soltasse do substrato. Após esse processo, dois prendedores de papel foram utilizados para manter os componentes no lugar e possibilitar o manuseio durante o teste das células.

Figura 30 - Etapas de montagem das células: o eletrodo de TiO_2 (a); o posicionamento do isolante (b); a inserção do eletrólito (c) e (d); o contra eletrodo contendo a deposição de carbono (e) e a célula solar após a montagem (f)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

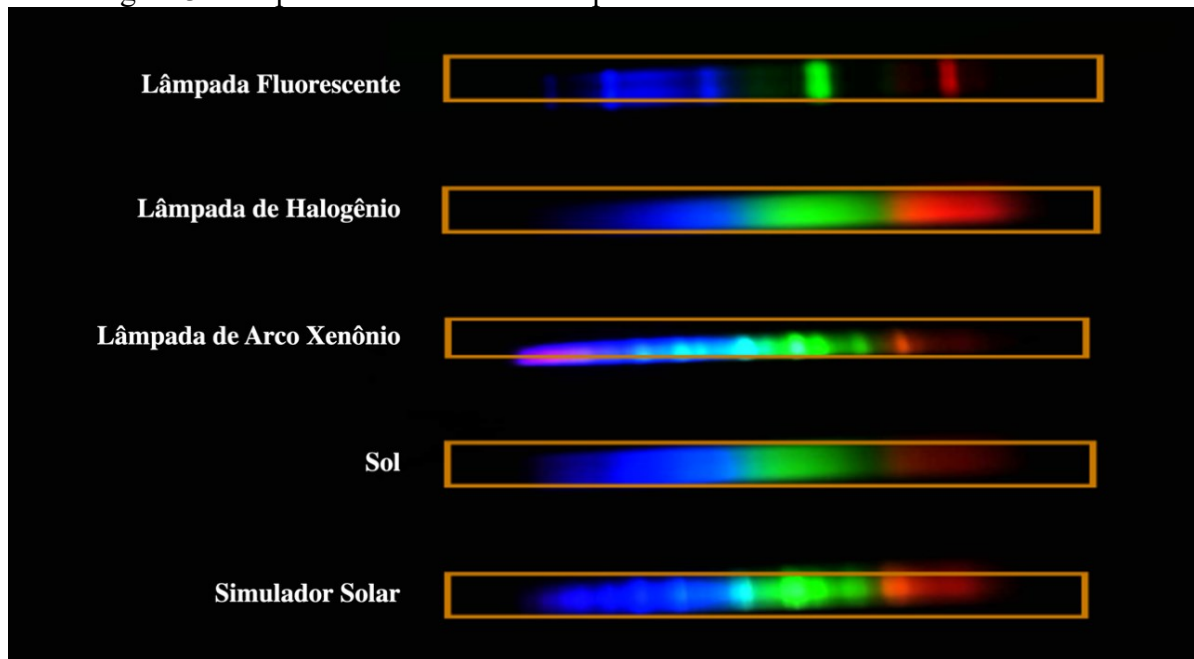
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho. Para facilitar a discussão, o capítulo foi dividido em seções, onde são discutidos os resultados obtidos para cada equipamento desenvolvido, bem como o desempenho das células solares avaliado através desses equipamentos.

4.1 ESPECTRÔMETRO

As imagens dos espectros da luz visível obtidas através do espectrômetro desenvolvido, para o Sol e para as lâmpadas fluorescente, de halogênio e de arco xenônio, são apresentadas na Figura 31.

Figura 31 - Espectros obtidos com o espectrômetro desenvolvido neste trabalho



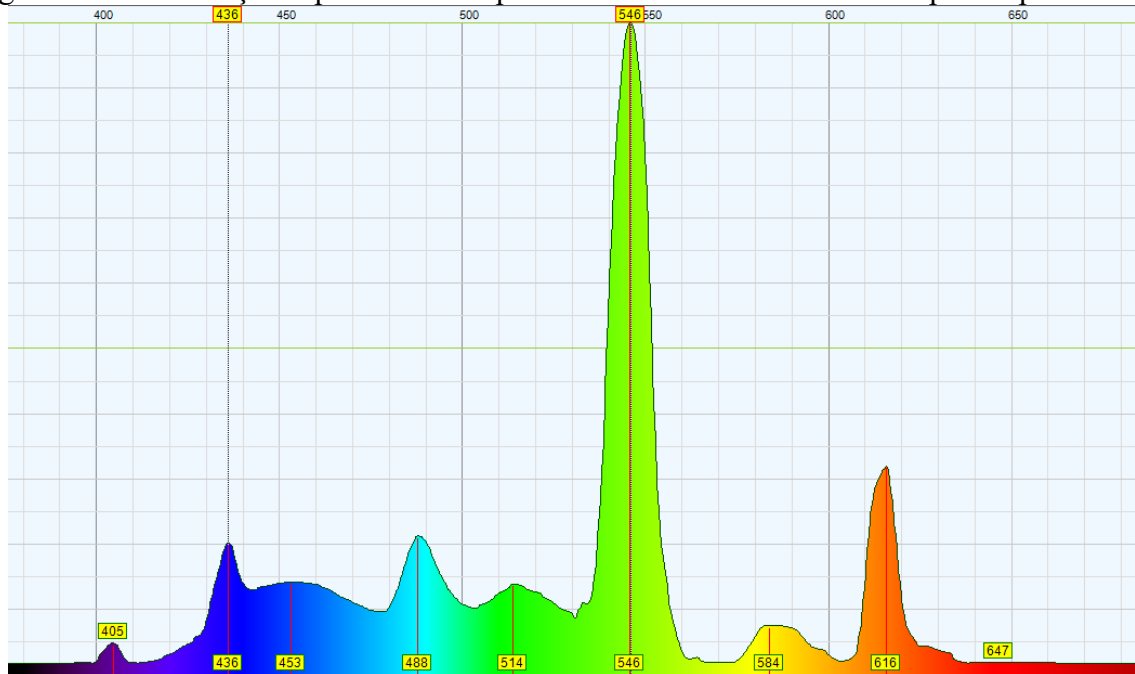
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O gráfico de distribuição espectral gerado para a lâmpada fluorescente após processamento das imagens é apresentado na Figura 32. Onde os picos em 434 nm e 546 nm são relativos à linha verde e a primeira linha azul no espectro da lâmpada fluorescente na Figura 31.

A validação dos dados obtidos pelo equipamento foi realizada a partir da comparação da distribuição espectral gerada para a lâmpada fluorescente (utilizada para calibração), com a

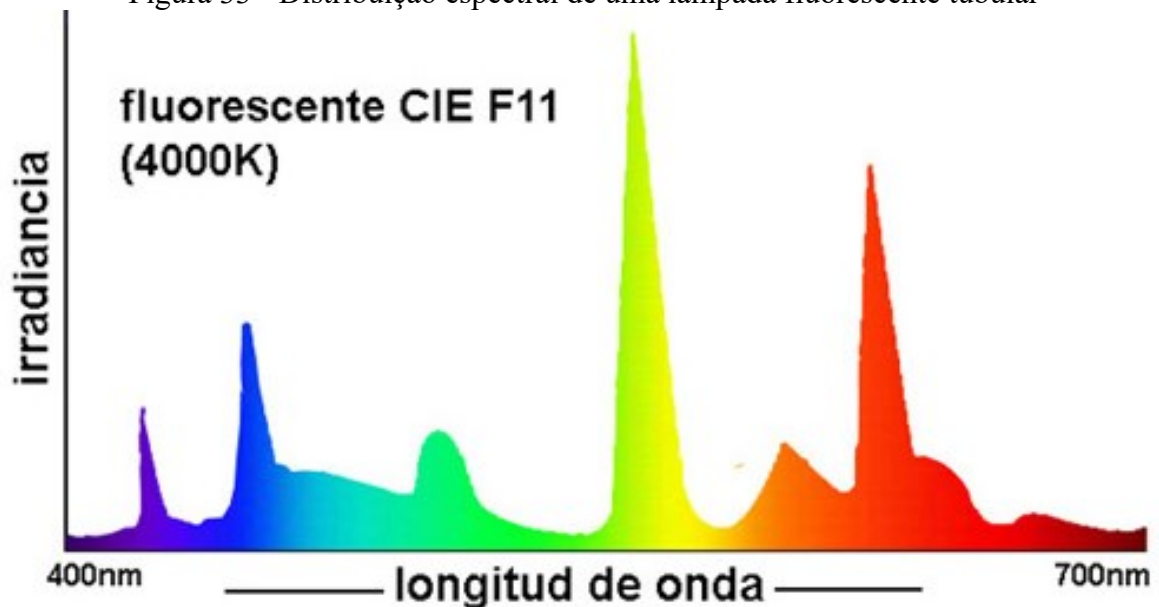
distribuição espectral de uma lâmpada fluorescente tubular apresentada na Figura 33, a qual foi obtida na página de um fornecedor de equipamentos de espectrometria.

Figura 32 - Distribuição espectral da lâmpada fluorescente TKT 15 obtido pelo espectrômetro



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Figura 33 - Distribuição espectral de uma lâmpada fluorescente tubular



Fonte: QUANTOTEC (2021).

As imagens, e em consequência, os espectros obtidos pelo espectrofotômetro apresentam boa qualidade, onde apesar da simplicidade, a distribuição espectral obtida é comparável a de um equipamento profissional, conforme análise comparativa dos espectros da Figura 32 com a Figura 33.

Entretanto, o equipamento possui limitações, o sensor da câmera utilizada possui filtro de infravermelho, o que limita o espectro a região de comprimentos de onda visíveis. A remoção do filtro é possível em alguns modelos de webcams, o que possibilitaria estender o intervalo de comprimento para a região do infravermelho, o que não se aplica a webcam utilizada. Assim, os gráficos de distribuição espectrais obtidos com o espectrômetro apenas contemplam a região visível do espectro. As distribuições espectrais para as demais fontes de irradiação da Figura 31 são apresentados na próxima sessão, onde são a base para a discussão do desempenho do simulador solar.

4.2 SIMULADOR SOLAR

O desempenho do simulador solar foi avaliado por meio da intensidade da radiação e da sua distribuição espectral. A intensidade da irradiação máxima gerada pelo simulador foi de aproximadamente 2000 W/m^2 , a qual ocorre quando a lente está posicionada próxima às lâmpadas, o reposicionamento da lente possibilita definir a intensidade desejada.

O posicionamento da lente foi estabelecido quando o sensor de luminosidade indicou uma irradiação próxima a 1075 W/m^2 , nesse momento a lente foi travada e os testes foram realizados. A Figura 34 apresenta o momento da aferição e calibração do equipamento por meio do sensor de luminosidade, evidenciando a intensidade da irradiação produzida pelo simulador solar.

A forma mais correta e aceita para a aferição da intensidade da irradiação é através do uso de células de referência, as quais consistem em células que possuem valores de corrente e tensão conhecidos, os quais foram obtidos anteriormente utilizando as condições padrões de teste. Assim, o simulador tem a radiação avaliada por meio da tensão e corrente gerados na célula de referência. Entretanto, devido a indisponibilidade desse dispositivo no momento dos testes, foi utilizado o sensor do celular, o qual possibilitou uma boa aproximação para a intensidade da irradiação gerada.

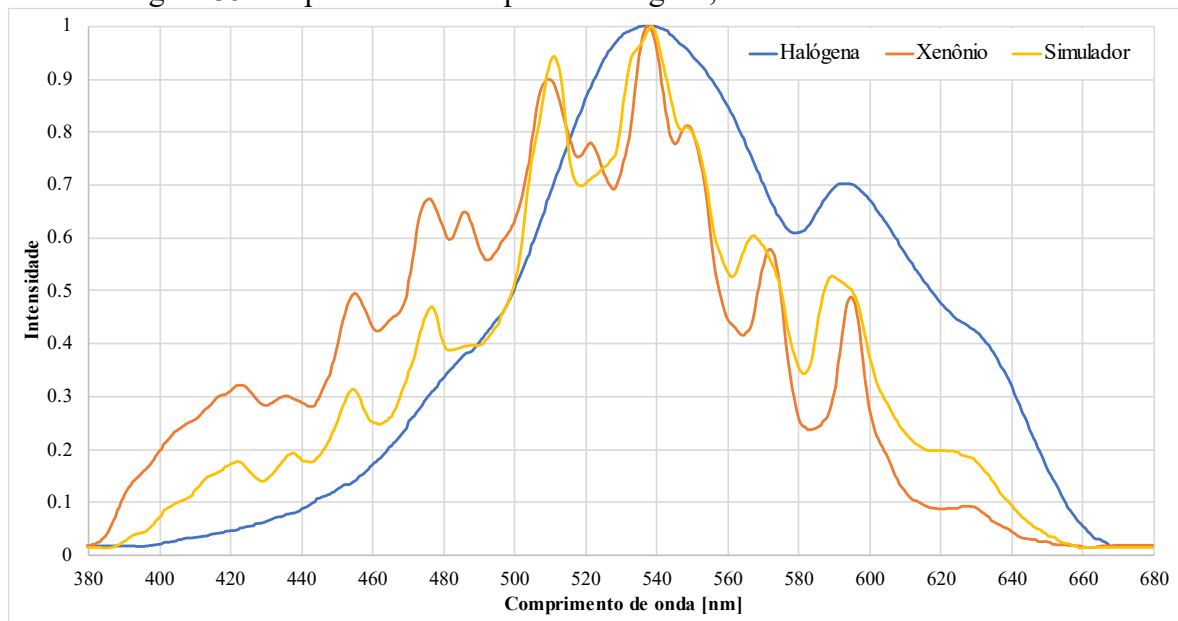
Figura 34 - Calibração do simulador solar por meio do aplicativo *Photometer Pro* utilizando o sensor de um Samsung *Galaxy S8 Plus*.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Os gráficos de distribuição espectral para a lâmpada halógena, de xenônio e do simulador (combinação das duas lâmpadas), obtidos através do espectrômetro construído são apresentados na Figura 35. No gráfico, é possível perceber que lâmpada halógena possui maior intensidade nos comprimentos de onda próximos ao vermelho, se fosse possível a visualização da radiação infravermelha, a lâmpada halógena apresentaria boa parte da distribuição da irradiação nessa região. Já a lâmpada de xenônio apresenta maior intensidade de irradiação na região do azul e do ultravioleta. A junção das duas lâmpadas (simulador) possibilitou a obtenção de uma distribuição espectral que consegue contemplar tanto a região do ultravioleta como a do vermelho/infravermelho.

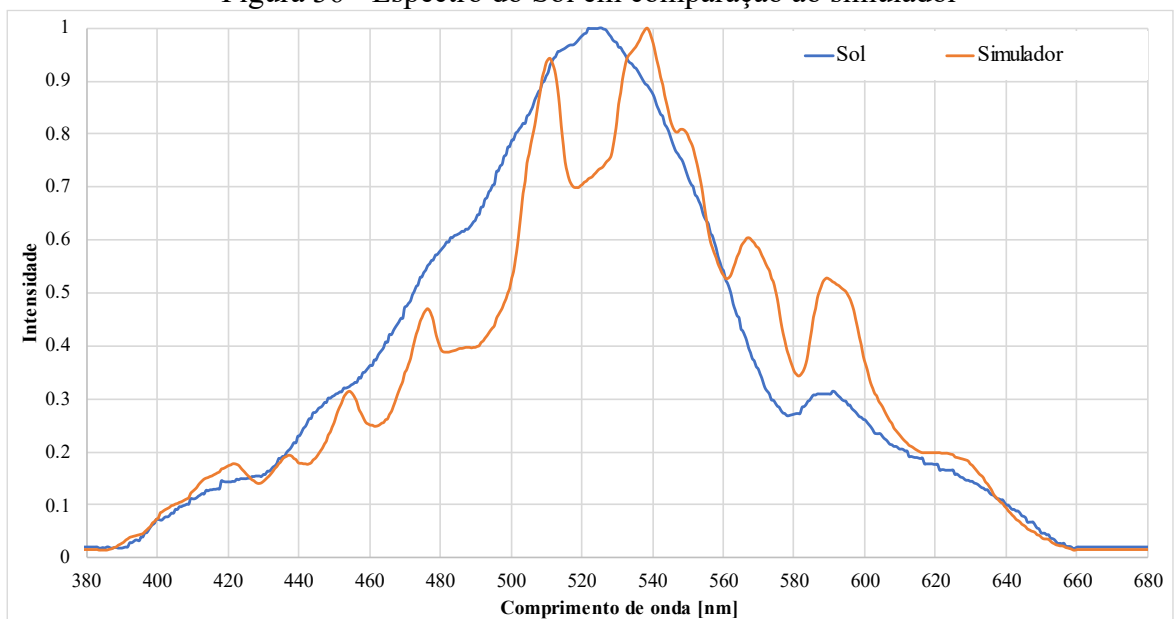
Figura 35 - Espectros das lâmpadas: halógena, de xenônio e do simulador



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O espectro do simulador é apresentado ao lado do espectro do Sol na Figura 36. Na figura, é possível perceber que o espectro do simulador se aproxima da distribuição espectral da irradiação solar na região da luz visível. Porém devido a limitação do espectrômetro construído, não foi possível comparar a distribuição espectral para os demais comprimentos de onda.

Figura 36 - Espectro do Sol em comparação ao simulador

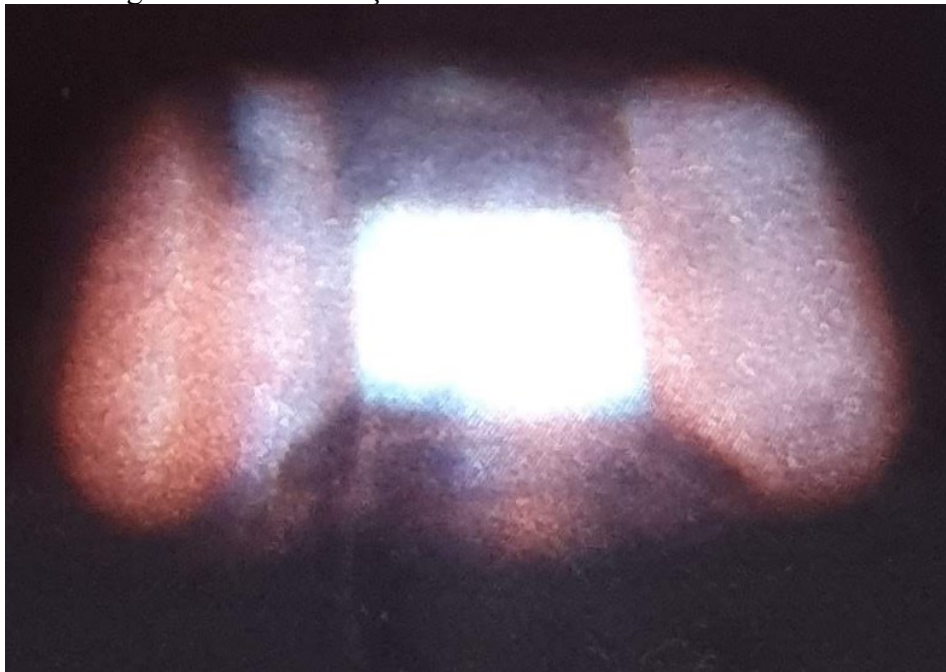


Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

De todo modo, a boa similaridade do espectro da radiação solar em relação ao simulador dentro da região visível e a intensidade de radiação obtidas foram consideradas suficientes para a simulação da radiação solar.

A distribuição do feixe de luz gerado pelo simulador é apresentada na Figura 37. Na fotografia, capturada utilizando um fundo preto e baixo tempo de exposição, é possível perceber uma maior uniformidade da radiação na região central, delimitando uma área retangular, a qual é consequência do formato da abertura na tampa inferior do equipamento destinada a passagem da luz.

Figura 37 – Distribuição do feixe de luz do simulador solar



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

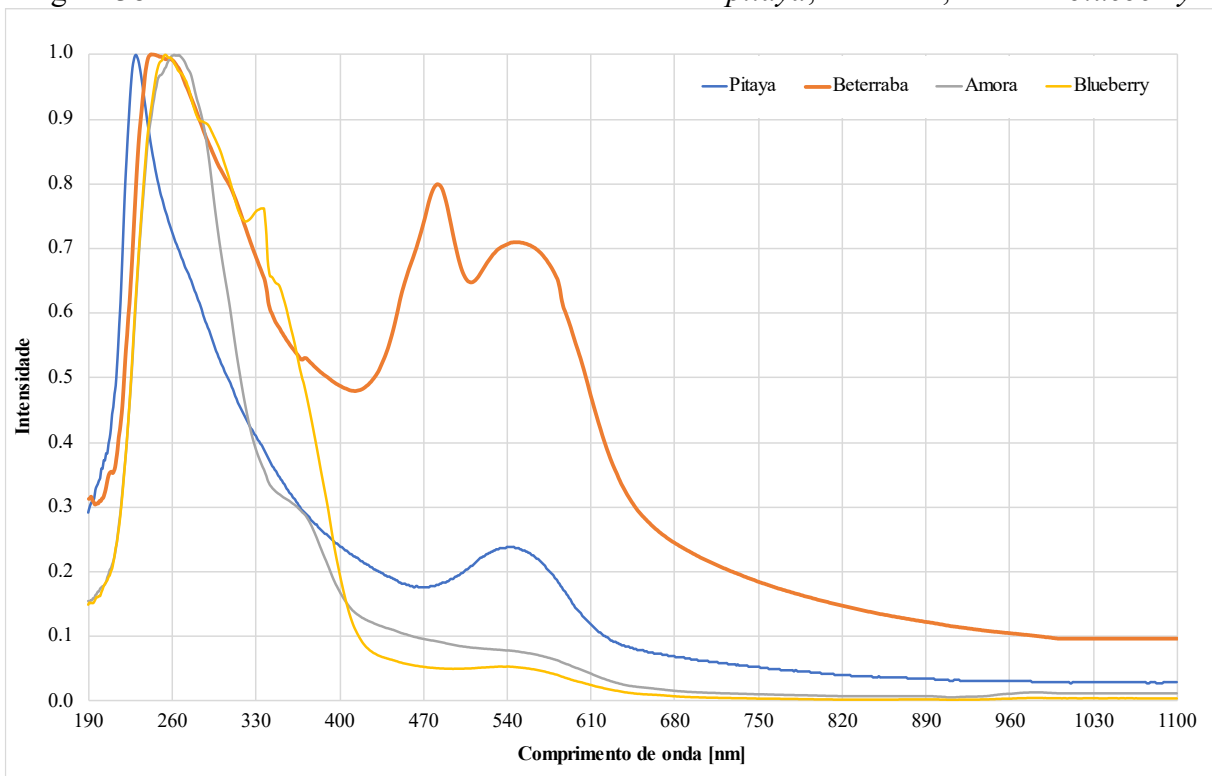
A análise espectroscópica indicou que a distribuição da radiação do simulador solar é diferente quando comparada as distribuições individuais de cada lâmpada. Entretanto, a configuração empregada para as lâmpadas não proporciona uma mistura perfeita dos espectros, para isso, seria necessário a construção de um conjunto óptico para cada lâmpada, onde a associação dos espectros seria realizada sobre a superfície de teste.

No entanto, a distribuição foi considerada satisfatória, tendo em vista que a área das células solares que se deseja avaliar é da ordem de $0,2 \text{ cm}^2$. Além disso, nessa configuração é necessário apenas um conjunto de lente e refletor, o que torna o equipamento mais compacto e menos oneroso.

4.3 ANÁLISE UV-VIS DOS CORANTES

Os dados de absorção para os extratos etanólicos de *pitaya*, beterraba, amora e *blueberry* foram normalizados e são apresentados na Figura 38. A concentração exata das soluções analisadas não é conhecida, dado a dependência da composição das frutas. De modo geral, todos os extratos apresentam absorção na região visível e ultravioleta.

Figura 38 - Análise UV-Vis dos extratos etanólicos de *pitaya*, beterraba, amora e *blueberry*



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Os extratos de amora, *blueberry* e *pitaya* apresentaram um leve pico de absorção na região de 540 nm, sendo relacionado a presença de antocianinas, as quais são responsáveis pela coloração roxo-avermelhada dessas frutas. A baixa intensidade dos sinais da amora e do *blueberry* pode estar relacionada à concentração dos corantes obtidos no processo de extração e à diluição realizada para a análise no espectrofotômetro de UV-Vis. Para a beterraba, o pico próximo a 540 nm é relativo à presença de betacianinas, as quais pertencem a classe de corantes naturais betalainas, apresentando coloração avermelhada. A beterraba também possui um pico próximo a 470 nm, indicando a presença de betaxantina, uma betalaina de cor amarela (SONAI *et al.*, 2015).

4.4 CURVAS I-V

Após a construção das células solares, foi realizado a avaliação dos seus parâmetros elétricos empregando o simulador solar e o traçador de curvas I-V. Em um primeiro momento, foram obtidos os pontos de tensão e corrente da célula sensibilizada com *pitaya* utilizando o potenciômetro como carga variável.

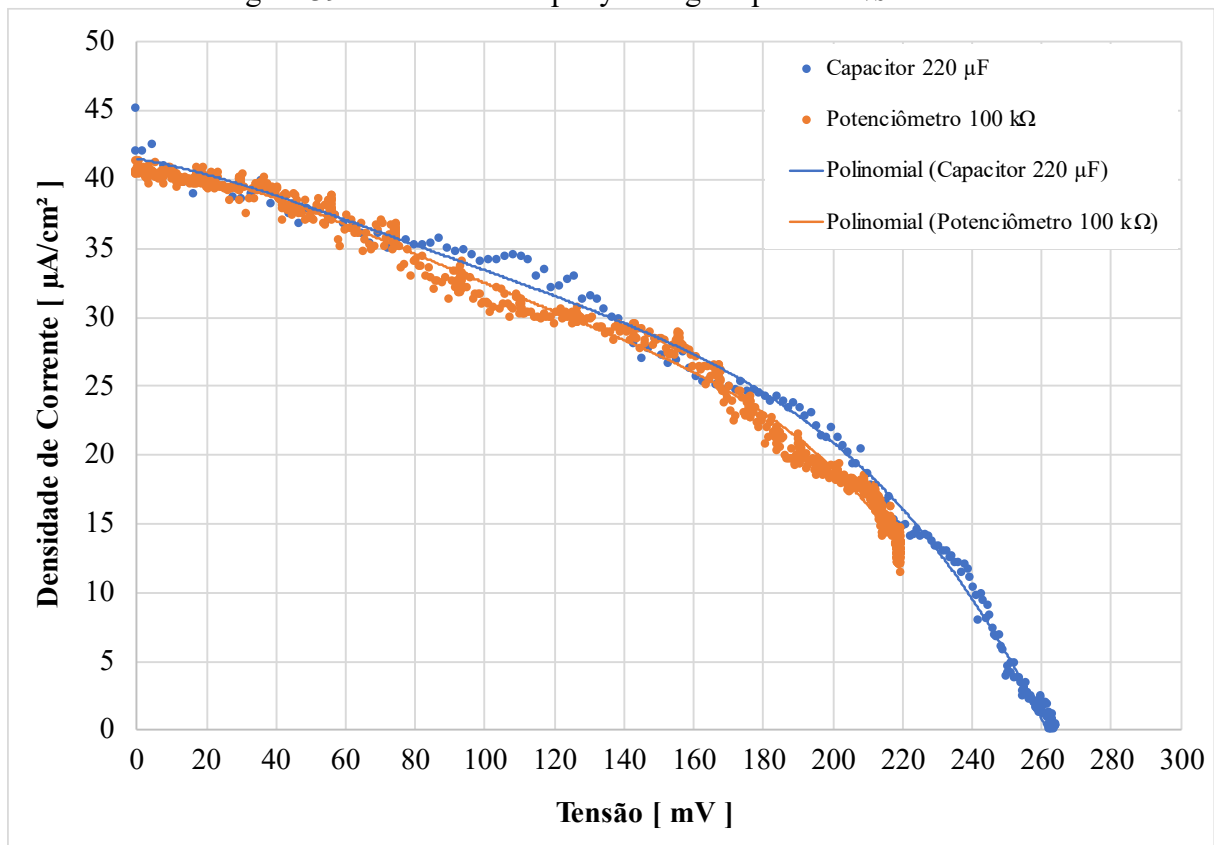
A obtenção dos dados foi iniciada e o eixo do potenciômetro foi girado lentamente até o ângulo máximo, o qual representa uma resistência de aproximadamente 100 k Ω , onde era esperado que esse valor fosse suficiente para a simulação de um circuito aberto. Entretanto, mesmo na posição de máxima resistência, a corrente lida foi maior que zero, indicando que não foi possível atingir a condição de circuito aberto.

Para contornar o problema e prosseguir com as análises, o potenciômetro foi substituído por um capacitor eletrolítico. A capacidade necessária foi determinada empiricamente, onde foram testados os modelos disponíveis no laboratório: 10 μ F, 100 μ F, 220 μ F e 1000 μ F. Dentre esses, o que possibilitou a obtenção de um bom número de pontos com uma boa uniformidade foi o de 220 μ F. Os de menor capacidade atingiram a carga máxima em um intervalo de tempo muito pequeno, reduzindo o número dos pontos gerados, enquanto o de maior capacidade se aproximou da condição de circuito aberto, porém a corrente não convergiu para zero, mesmo após um grande período de coleta de dados.

A Figura 39 apresenta a curva I-V obtida por meio da carga resistiva em comparação a capacitiva, onde a célula analisada nos dois casos foi a sensibilizada com *pitaya*. Os pontos representam os pares de tensão e corrente obtidos pelo equipamento, enquanto as linhas representam uma aproximação polinomial gerada através do *Microsoft Excel*. A intensidade da irradiação durante a obtenção da curva foi de aproximadamente 1075 W/m² com a distribuição espectral da Figura 36.

Considerando as linhas de tendência, as curvas possuem boa proximidade e um formato semelhante. Além disso, é possível observar a limitação do potenciômetro descrita anteriormente, note que a curva I-V gerada com a carga resistiva (laranja) não intercepta o eixo de tensão, enquanto a curva obtida com a carga capacitiva (azul) alcança a tensão máxima quando a corrente é zero. Com base nisso, o potenciômetro foi substituído pelo capacitor de 220 μ F possibilitando a continuidade das análises.

Figura 39 – Curva I-V da pitaya: carga capacitiva vs resistiva



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A densidade de corrente (mA/cm^2) apresentada nos gráficos é obtida dividindo o valor da leitura de corrente pela área da célula solar, a qual é calculada considerando o diâmetro de 5 mm do perfurador de papel empregado na fabricação das máscaras de deposição.

A Tabela 3 apresenta a resolução do equipamento considerando o intervalo de leitura da porta analógica, no caso, inteiros de 0 a 1023 que são mapeados de 0 até a tensão de referência. Para a avaliação dos parâmetros de desempenho das células foi considerado apenas o erro associado a resolução de leitura do Arduino. Assim, o erro da leitura da tensão é de ± 1 mV e da corrente é de $\pm 2 \mu\text{A}$.

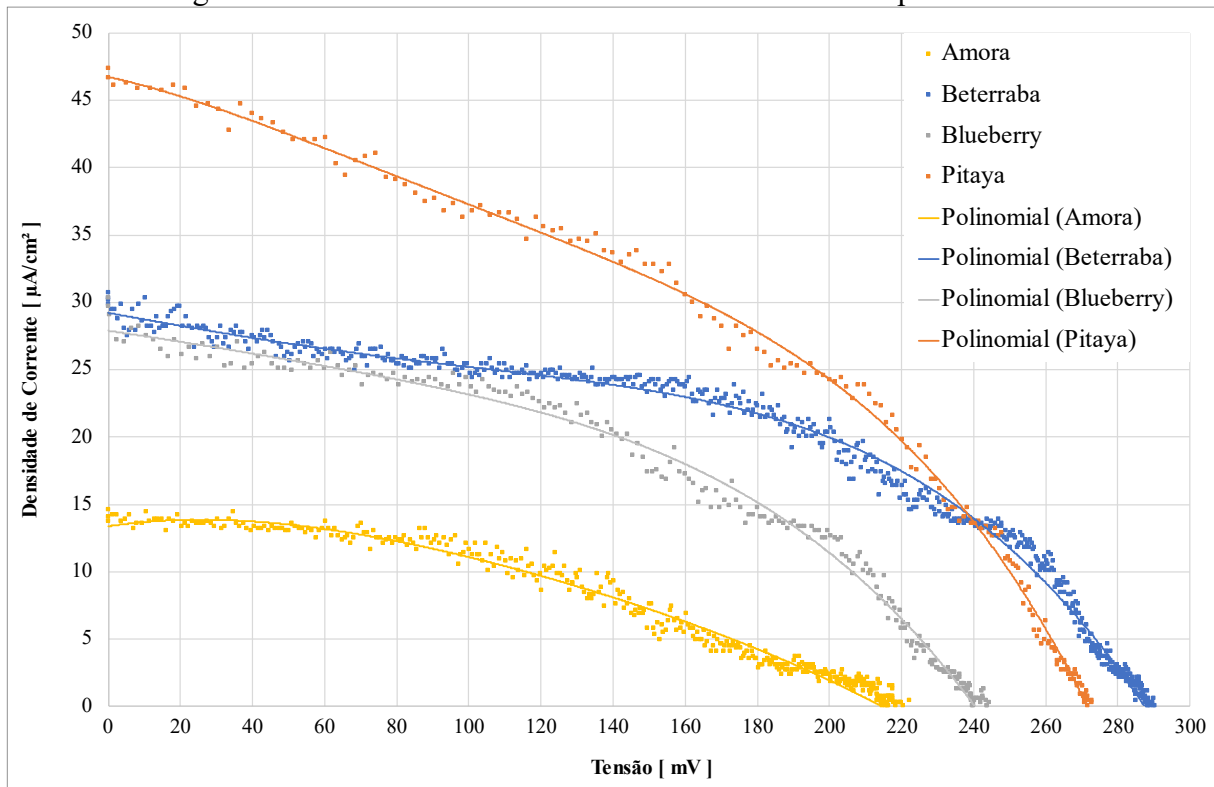
Tabela 3 - Resolução do equipamento

-	Leitura da tensão	Leitura da corrente
Porta	A0	A3
Leitura (inteiro)	0 a 1023	0 a 1023
Mapeamento	0 V a 1,100 V	-1,100 V a 1,100 V
Intervalo	1.100 V	2.200 V
Resolução	$(1,100/1024) = 0,001 \text{ V}$	$(2,200/1024) = 0,002 \text{ V} \rightarrow 2 \mu\text{A}$

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As curvas I-V obtidas para todas as células podem ser visualizadas na Figura 40. A maior corrente de curto-circuito é a da *pitaya*, enquanto a maior tensão de circuito aberto é a da beterraba. As curvas para a beterraba e o blueberry estão muito próximas, não sendo possível afirmar qual possui a maior corrente de curto-circuito.

Figura 40 - Curvas I-V das células solares sensibilizadas por corantes



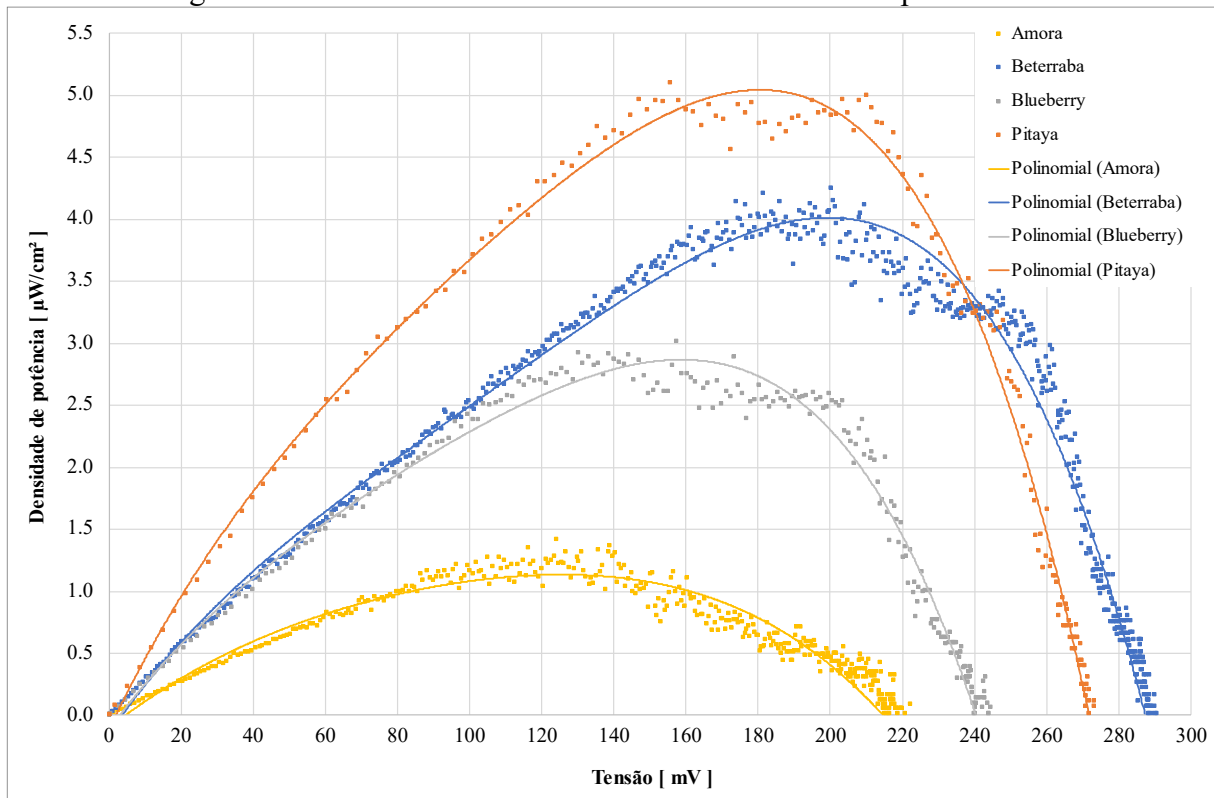
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

De um ponto de vista mais criterioso, considerando o erro de $\pm 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ propagado na determinação da densidade de corrente, as observações realizadas perdem a validade, tendo em vista que dentro desse intervalo, os valores poderiam se sobrepor. Porém, para a tensão, o erro associado é de $\pm 1 \text{ mV}$, o que permite comparar as tensões de circuito aberto das células, pois a distância entre esses pontos é superior a margem de erro. Além disso, a tensão de circuito aberto aferida nas células pelo equipamento construído foi igual a tensão aferida por um multímetro digital profissional True Rms modelo DTG-101. Onde o multímetro foi conectado em paralelo com a célula após a carga do capacitor (final da obtenção da curva). A corrente de curto-circuito não pode ser avaliada com o multímetro pois o valor é menor que a escala mínima de leitura.

Na Figura 40 é possível verificar que os pontos estão bem distribuídos ao redor da curva, o que indica que o capacitor escolhido possui um valor razoável, onde seu tempo de

carga permitiu a obtenção de vários pontos de tensão e corrente. Entretanto a precisão do equipamento precisa ser melhorada pois as flutuações entre pontos vizinhos são bastante significativas, o que fica bem evidente na curva de tensão vs potência apresentada na Figura 41.

Figura 41 - Curvas P-V das células solares sensibilizadas por corantes



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O traçador de curvas foi planejado tendo como parâmetros de operação um intervalo de 0 a 1000 μA , onde era esperado que as correntes geradas pelas DSSC's fossem superiores a 500 μA . Assim, as portas analógicas do Arduino iriam realizar leituras de tensões da ordem de 500 mV no circuito amplificador e a resolução de 2 mV seria suficiente. Entretanto, a corrente de curto-circuito gerada pelas células foi muito pequena, e por mais que o dispositivo tenha sido capaz de realizar as leituras, o erro associado é muito elevado.

O erro nas leituras pode ser reduzido aumentando a resolução do equipamento, o que pode ser feito reduzindo o valor da tensão de referência. Entretanto, o aumento da precisão tem como consequência a redução do intervalo de tensão que o equipamento pode avaliar, pois este sempre estará limitado ao valor da tensão de referência. Alternativas são a utilização de um microcontrolador que possui um conversor analógico digital de 12 bits, o que

permitiria mapear valores de tensão em um intervalo de 0 a 4095 ao invés de 0 a 1023. Outra possibilidade é a construção de células com maior área superficial, assim, a densidade de corrente será maior, possibilitando leituras mais precisas.

Agora, supondo que os dados obtidos e utilizados para a obtenção da curva de potência vs tensão na Figura 41 sejam realmente próximos do valor real, é possível utilizá-los para calcular os parâmetros de desempenho das células e seus diferentes corantes, os quais são apresentados na Tabela 4. Os valores obtidos para a eficiência das células, mesmo desconsiderando a margem de erro, foram extremamente baixos, segundo Smestad e Grätzel (1998), corantes naturais baseados em antocianinas possuem eficiência que varia de 0,5% a 1%.

Tabela 4 - Parâmetros fotoelétricos das células DSSC sensibilizadas pelos corantes naturais

Extrato	Classe de corantes	V_{oc} [mV]	J_{sc} [μ A/cm ²]	J_m [μ A/cm ²]	V_m [mV]	P_m [μ W/cm ²]	P_{in} [W/cm ²]	FF	η
Pitaya	antocianinas	273 ± 1	47 ± 10	33 ± 10	155 ± 1	5	0.1075	0.40	0.005 %
Beterraba	betalaínas	292 ± 1	30 ± 10	21 ± 10	200 ± 1	4	0.1075	0.48	0.004 %
Blueberry	antocianinas	246 ± 1	30 ± 10	19 ± 10	157 ± 1	3	0.1075	0.40	0.003 %
Amora	antocianinas	224 ± 1	14 ± 10	11 ± 10	124 ± 1	1	0.1075	0.43	0.001 %

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A baixa eficiência em relação aos valores esperados pode estar relacionada tanto aos equipamentos quanto a metodologia empregada na construção das DSSC's. Dentre esses fatores, o mais provável é a metodologia empregada nas DSSC's, tendo em vista que o método utilizado para aferir a intensidade da radiação do simulador foi empregado para avaliar a radiação externa em um dia de céu aberto e o valor lido foi próximo ao esperado para aquele horário e época do ano. Quanto ao traçador I-V, as tensões aferidas pelo Arduino foram comparadas com a leitura realizada por um multímetro, onde os valores obtidos foram bem similares.

Considerando a metodologia da montagem das DSSC's, diversos fatores como a temperatura de sinterização do TiO₂, a concentração de corantes na fruta utilizada e o tempo de sensibilização podem influenciar no rendimento da célula. A temperatura de sinterização pode não ter sido suficiente, tendo em vista que a chapa de aquecimento utilizada atinge no máximo 350 °C e na literatura a temperatura ideal é em torno de 450 °C (SMESTAD; GRÄTZEL, 1998). O tempo de sensibilização de 3 horas poderia ser maior ou a solução

sensibilizadora deveria ser mais concentrada, um indicativo disso é a fraca coloração dos eletrodos preparados.

Apesar disso, o traçador de curvas foi capaz de gerar curvas suaves com uma boa distribuição de pontos, e dado a simplicidade dos materiais utilizados, apresenta grande potencial de uso como dispositivo de avaliação de células solares de baixa potência, ao menos como uma ferramenta de análise inicial do potencial de aplicação. Para dados mais confiáveis, o equipamento precisa ser melhorado para que seja possível aumentar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi construído uma série de equipamentos de baixo custo que foram associados e utilizados para a obtenção dos parâmetros fotoelétricos de células solares sensibilizadas por corantes. De modo geral, os objetivos propostos foram cumpridos, sendo obtidos um espectrômetro, um simulador solar, um traçador de curvas I-V e realizado a extração e aplicação de corantes naturais nas células solares.

Em relação aos equipamentos, o traçador de curvas I-V construído permitiu a obtenção das curvas características para cada célula, fornecendo os parâmetros para a realização dos cálculos do fator de forma e da eficiência. As curvas apresentam boa distribuição dos pontos de tensão e corrente, porém as densidades de corrente foram muito baixas, de modo que os dados obtidos são apenas aproximações, tendo em vista que o erro associado é bem significativo.

O espectrômetro apresentou resultados satisfatórios, onde foi possível obter as distribuições espectrais na região visível para as lâmpadas empregadas no simulador e comparar com o espectro solar. A irradiação do simulador solar atingiu mais de 2000 W/m^2 e o ajuste focal possibilitou a regulagem da densidade de potência para valores próximos a condição padrão de teste de 1000 W/m^2 . Entretanto, a distribuição espectral precisa ser trabalhada com a aplicação de filtros de radiação ultravioleta e de infravermelho.

A baixa densidade de corrente gerada pelas células foi atribuída a metodologia aplicada na montagem, onde os fatores como a temperatura de sinterização, o tempo de extração, o tempo de sensibilização e a escolha dos corantes são os pontos mais críticos que precisam ser reavaliados.

Além disso, o desenvolvimento desse trabalho possibilitou a compreensão dos equipamentos, técnicas e parâmetros que devem ser atingidos para que seja possível realizar a caracterização de DSSC's. Por fim, os resultados obtidos serão utilizados para melhorar a confiabilidade e a precisão dos equipamentos.

5.1 PERSPECTIVAS

Para que os equipamentos possam ser utilizados no laboratório, será necessário melhorar a precisão e realizar a validação dos dados através de sensores e dispositivos mais confiáveis.

Para o simulador solar, é necessário a aplicação de filtros de luz ultravioleta e de radiação infravermelha, e a intensidade da radiação pode ser calibrada através do uso de uma célula de referência. Associado a isso, a câmera do espectroscópio pode ser substituída por outra que permita a remoção do filtro de infravermelho, o que possibilitaria estender o intervalo de leitura do equipamento, o qual poderia ser utilizado para a avaliar o simulador solar além da radiação visível. Com isso, será possível realizar a classificação do simulador solar com base em uma análise estatística do casamento espectral.

O traçador de curvas I-V pode ser avaliado por um osciloscópio, de modo a validar de forma mais efetiva as leituras realizadas pelo Arduino. Também é possível empregar dois microcontroladores no traçador I-V, onde um ficaria responsável pela leitura da tensão e outro pela corrente, essa alteração permitiria o emprego de fontes de tensão de referência distintas, possibilitando o aumento da resolução do equipamento. Além disso, uma célula solar de curva I-V conhecida pode ser utilizada para validar as curvas obtidas pelo equipamento.

REFERÊNCIAS

- AGNALDO, J. S.; BASTOS, J. B. V; CRESSONI, J. C.; VISWANATHAN, G. M. Células solares de TiO₂ sensibilizado por corante (TiO₂ dye sensitized solar cells). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 77–84, 2006.
- ALVES, G. G. **Materiais e Métodos de Fabricação de Células Solares Híbridas DSSC para Integração em Edificações**. 2016. 56 f. IPT, São Paulo, 2016.
- ARAÚJO, A. L. P. L. de; LOPES, A. V. dos S.; MOREIRA, A. B. Topologias Em Traçador De Curva I-V Aplicados Em Módulos Fotovoltaicos. **Engenharia Elétrica: O Mundo sob Perspectivas Avançadas**, , p. 76–93, 2020. <https://doi.org/10.22533/at.ed.1382113056>.
- BRITO, E. M. da S.; PEREIRA, H. A.; RIBEIRO, A.; CUPERTINO, A. F. Caracterização De Curvas De Painéis Fotovoltaicos Baseado Em Carga Capacitiva : Análise Do Transitório Do Capacitor. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2016. .
- BÜHLER, A. J.; GABE, I. J.; SANTOS, F. H. dos. Uma Revisão Sobre As Tecnologias Fotovoltaicas Atuais. **Energia solar e eólica**, , p. 10–25, 2019. <https://doi.org/10.22533/at.ed.6671922011>.
- CASTRO, T. D. J. Confecção de espectrômetro de baixo custo para aplicações Didáticas. 2017.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma caixinha para o estudo de espectros. **Física na Escola**, , p. 40–42, 2002.
- CHRIST, I. de S.; NUNES DE ALMEIDA, K.; GRANVILLA DE OLIVEIRA, V.; COSTA DE OLIVEIRA, M.; JOSÉ, M.; SANTOS, L.; ATZ, N. R. Célula solar na escola. v. 41, p. 394–398, 2019. <https://doi.org/10.21577/0104-8899.20160180>.
- CRESESB. Energia solar - princípios e aplicações. , p. 28, 2006.
- ELY, F.; SWART, J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **O Setor Elétrico - Espaço do IEEE**, , p. 138–139, 2014.
- FEITOSA, A. de V.; SOUSA, J. H. de A.; CAVALCANTE, F. S. Á. Células Solares Sensibilizadas Com Corantes Naturais Extraído das Plantas Nerium Oleander e Portulaca Grandiflora. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1191–1196, 28 set. 2016.
- GARCIA, N. M. D.; KALINOWSKI, H. J. Um espectroscópio simples para uso individual. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, , p. 332–338, 1 jan. 2004. <https://doi.org/10.5007/%x>.
- GEORGESCU, A.; DAMACHE, G.; GÎRȚU, M. A. Class A small area solar simulator for dye-sensitized solar cell testing. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**, v. 10, n. 11, p. 3003–3007, 2008.
- GRÄTZEL, M. Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells. **Inorganic Chemistry**, v. 44, n. 20, p. 6841–6851, 3 out. 2005. <https://doi.org/10.1021/ic0508371>.

INNOCENTE, P. R.; BONIATTI, V. Construção de um simulador solar. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 7217–7227, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-138>.

MARCHEZI, P. E. Eletrólito polimérico gel contendo óxido de grafeno reduzido para aplicação em células solares sensibilizadas por corante. 2015.

O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. **Nature**, v. 353, n. 6346, p. 737–740, 24 out. 1991. <https://doi.org/10.1038/353737a0>.

ODENWALD, S. Smartphone sensors for citizen science applications: Light and sound. **Citizen Science: Theory and Practice**, v. 5, n. 1, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.5334/cstp.254>.

PEREIRA, E.; MARTINS, F.; GONÇALVES, A.; COSTA, R.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. <https://doi.org/10.34024/978851700089>.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

RAPHAEL, E.; SILVA, M. N.; SZOSTAK, R.; SCHIAVON, M. A.; NOGUEIRA, A. F. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, v. 41, n. 1, p. 61–74, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170127>.

REZKY, A.; DEVARA, K.; SATYA WARDANA, N.; RAMADHANTY, S.; ABUZAIRI, T. Simple method for I-V characterization curve for low power solar cell using arduino nano. [s. d.]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186701020>.

SERPA, R. B. **Filmes de TiO₂ eletrossintetizados sobre ITO com aplicabilidade em células fotoeletroquímicas e fotovoltaicas**. 2013. 130 f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SMESTAD, G. P.; GRÄTZEL, M. Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter. **Journal of Chemical Education**, v. 75, n. 6, p. 752–756, 1998. <https://doi.org/10.1021/ed075p752>.

SOLÉ, J. G.; BAUSÁ, L. E.; JAQUE, D. **An Introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids**. 2005.

SONAI, G. G.; JR, M. A. M.; NUNES, J. H. B.; JR, J. D. M.; NOGUEIRA, A. F. Células solares sensibilizadas por corantes naturais: Um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. **Química Nova**, v. 38, n. 10, p. 1357–1365, 2015. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150148>.

SOUZA, A. R. de; PAIXÃO, A. C.; DIAS, M. A.; DUARTE, S.; AMORIM, H. S. de. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 21 mar. 2011.

SOUZA, F. Entendendo as Entradas Analógicas do Arduino. 2013. **Embarcados**. Available

at: <https://www.embarcados.com.br/arduino-entradas-analogicas/>. Acesso em: 30 ago. 2021.
TONIAL, I. B.; SILVA, E. L. A QUÍMICA DOS CORANTES NATURAIS: UMA ALTERNATIVA PARA O ENSINO DE QUÍMICA. 2008.

TRACTZ, G. T. ; DIAS, B. V. ; BANCZEK, E. P. ; DA CUNHA, M. T. ; ALVES, G. J. T. ;; RODRIGUES, P. R. P. Células Solares Sensibilizadas por Corante (CSSC): Perspectivas, Materiais, Funcionamento e Técnicas de Caracterização. **Rev. Virtual Quim**, , p. 748–774, 2020. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200060>.

VASCONCELOS, Y. O desafio do Sol. 2013. **Fapesp**. Available at: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-sol/>. Acesso em: 19 set. 2021.

VEISSID, N.; VAZ, C. C. Simulador Solar De Baixo Custo (Solsim): Simulação Da Corrente Fotogerada Em Diferentes Células Solares. v. II, n. I, p. 71–77, 2011.

VITORETI, A. B. F. ; VAZ, R. ; PENA, A. L. ; RAPHAEL, E. ; FERRARI, J. L. ;; SCHIAVON, M. A. Titanium dioxide application in solar cells. , p. 1481–1510, 2017. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170086>.

VITORETI, A. B. F.; CORRÊA, L. B.; RAPHAEL, E.; PATROCINIO, A. O. T.; NOGUEIRA, A. F.; SCHIAVON, M. A. Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. **Química Nova**, v. 40, n. 4, p. 436–446, 27 nov. 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160192>.

WANG, W.; LAUMERT, B. Simulate a ‘Sun’ for Solar Research: A Literature Review of Solar Simulator Technology. , p. 1–37, 2014.