

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO PARA ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO  
TRANSMITIDA POR UMA CÉLULA SOLAR ORGÂNICA**

por

**Matheus Kreuz Haas**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, abril de 2023.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO PARA ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO  
TRANSMITIDA POR UMA CÉLULA SOLAR ORGÂNICA**

por

**Matheus Kreuz Haas**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Profa. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula – DEMEC/ UFRGS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bibiana Maitê Petry Ferraz – DELET/ UFRGS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, abril de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer e dedicar esta monografia às seguintes pessoas:

Minha mãe, Maristela, a mulher mais guerreira e perseverante que eu conheço, que me criou com muito amor e sempre irá vibrar em conjunto com minhas conquistas

Meu padrasto, Edson, por me criar como um filho e ser um verdadeiro parceiro para tudo

Meus avós Edgar, Hilária, Egon e Gertrudes, que me proporcionaram antecipadamente conhecimento que só é adquirido após muitos anos de vivência

Minhas tias Metie, Anete e Lisete, meus tios Guinter e Luís e minhas primas Bruna e Clara, que representam o amor e carinho incondicional pela família

Meu sogro Nestor e minha sogra Neusa, assim como meus cunhados Isabela e Caetano, por fazer eu me sentir parte da família desde os primeiros momentos juntos

Meus grandes amigos e colegas de curso Caroline Hansel, Elisa Gajardo, Felipe Selmo, Lorenzo Filippini, Matheus Schebella, Simone Flores, dentre outros que transformam o cotidiano em algo leve, interessante e divertido.

Meu grande amigo Vitão, que partilha de experiências e bons momentos comigo há 18 anos

Minha parceira de vida, Luisa Dahlem, que conheci no início da graduação e hoje, 6 anos depois, não consigo mais viver sem ela. Obrigado por compartilhar essa etapa da vida e possibilitar a construção de etapas futuras ao meu lado.

HAAS, M.K. **Construção de um Espectrômetro para Análise da Irradiação Transmitida por uma Célula Solar Orgânica**. 2023. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## **RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo a construção, calibração e validação de um espectrômetro para avaliação do espectro eletromagnético de ondas que atravessam uma célula solar orgânica semiopaca. Constrói-se o dispositivo utilizando um microcontrolador e um sensor espectral composto por múltiplos fotodiodos. Analisa-se previamente a resposta do instrumento construído para iluminação de cor única, aferindo se a resposta do sensor está de acordo com o esperado. Calibra-se o instrumento utilizando o espectro eletromagnético solar teórico, e em seguida, validam-se os valores lidos pelo dispositivo com duas lâmpadas LED de espectro conhecido: 2900 K e 5200 K. Avalia-se a irradiação que ultrapassa uma célula solar orgânica em diferentes regiões do módulo, mensurando quais comprimentos de onda têm sua intensidade impactada. Conforme resultados obtidos, o dispositivo confeccionado foi capaz de identificar radiação de cor única e também do espectro completo. No que diz respeito à célula solar orgânica em questão, esta apresentou baixa transparência e a absorção de grande parte do espectro que resulta em um aumento da temperatura desloca o pico do poder emissivo espectral para as faixas próximas ao infravermelho. A composição material da região de coloração azulada ocasionou o pico de emissão próximo dos 485 nm, coerente com a cor observada fisicamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** espectroscopia, células solares orgânicas, transparência.



HAAS, M. K. **Construction of a Spectrometer for Analysis of Radiation Transmitted by an Organic Solar Cell.** 2023. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

#### **ABSTRACT**

The objective of this work is the construction, calibration and validation of a spectrometer for the evaluation of the electromagnetic spectrum of waves that pass through a semi-opaque organic solar cell. The device is built using a microcontroller and a spectral sensor composed of multiple photodiodes. The response of the instrument built for single-color lighting is previously analyzed, checking whether the sensor response is in accordance with expectations. The instrument is calibrated using the theoretical solar electromagnetic spectrum, and then the values read by the device are validated with two LED lamps of known spectrum: 2900 K and 5200 K. different regions of the module, measuring which wavelengths have their intensity impacted. According to the results obtained, the manufactured device was able to identify single color radiation and also the full spectrum. With regard to the organic solar cell in question, it showed low transparency and the absorption of a large part of the spectrum that results in an increase in temperature shifts the peak of the spectral emissive power to the near-infrared ranges. The material composition of the bluish color region caused the emission peak close to 485 nm, consistent with the color observed physically.

**KEYWORDS:** spectroscopy, organic solar cells, transparency.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>2</b>
3.1 CÉLULAS SOLARES TRANSLÚCIDAS	2
3.2 REDUÇÃO DA ENERGIA TRANSMITIDA	3
3.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	4
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>5</b>
4.1 CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO	5
4.1.1 NODEMCU	5
4.1.2 SENSOR ESPECTRAL AS7341	6
4.1.3 ARDUINO IDE E BIBLIOTECAS	8
4.1.4 LEITURA DOS DADOS NO PYTHON	8
4.2 CÉLULA SOLAR SEMIOPACA	9
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	10
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>10</b>
5.1 VALIDAÇÃO PRÉVIA DA LEITURA DO ESPECTRÔMETRO	11
5.2 CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O ESPECTRO SOLAR TEÓRICO	12
5.3 VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO UTILIZANDO ESPECTROS CONHECIDOS	13
5.4 ESPECTRO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SEMIOPACO	14
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>16</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Painéis fotovoltaicos são uma forma de geração de energia renovável, que convertem a irradiação solar em eletricidade. A cada ano, novos recordes de eficiência são registrados em diferentes materiais fotovoltaicos (NREL, 2023), o que exemplifica o avanço das pesquisas que envolvem a energia solar. A combinação de diferentes materiais para a fabricação de células solares possibilitou o surgimento de painéis fotovoltaicos com propriedades únicas, como é o caso de células solares orgânicas semitransparentes. Devido a natureza do material, tais dispositivos possuem flexibilidade e permitem que parte da luz solar ultrapasse o material durante a produção de energia elétrica, o que viabiliza uma nova gama de aplicações, como vidro solar para edificações e estufas sustentáveis (Sun e Jasieniak, 2017).

É importante ressaltar que a transparência das células solares é um fator crucial em aplicações que exigem a entrada de luz solar, como em janelas solares. Nesses casos, a eficiência da célula solar é menos importante do que sua capacidade de permitir a entrada de luz solar no ambiente. Células solares com baixa transparência podem ter efeitos negativos no interior do ambiente, como a necessidade de iluminação artificial em edificações e a redução da fotossíntese de plantas em estufas agrícolas. O material da célula orgânica, muitas vezes colorido, pode ocasionar alterações no espectro eletromagnético da irradiação transmitida pelo material. Por isso, é fundamental avaliar cuidadosamente as características de células solares orgânicas semiopacas a serem utilizadas em cada situação específica, buscando reduzir ou eliminar seus efeitos negativos.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo a construção, calibração e validação de um espectrômetro para analisar o espectro eletromagnético da irradiação solar após ultrapassar uma célula solar orgânica, a fim de entender as propriedades ópticas do material. A irradiação incide em um sensor espectral, o qual se comunica com o microcontrolador. Os dados são lidos por um algoritmo desenvolvido em Python, que ilustra o comportamento espectral em tempo real. Na sequência, uma célula solar orgânica é exposta à irradiação solar, onde utiliza-se o instrumento para avaliar a influência do módulo solar no comportamento espectral que ultrapassa o material.

Células orgânicas têm o potencial de revolucionar a forma como a energia é gerada e consumida em edifícios e veículos, mas é importante entender as propriedades ópticas desses materiais para prevenir os efeitos negativos que possam ocorrer no interior do ambiente instalado. A análise espectral é uma ferramenta valiosa para essa compreensão e pode orientar o dimensionamento de células fotovoltaicas de acordo com a aplicação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fato de poder aproveitar a irradiação que atravessa uma célula fotovoltaica expandiu aplicações da geração solar. Edificações e estufas agrícolas sustentáveis são as duas maiores aplicações da tecnologia, permitindo a geração de eletricidade e ao mesmo tempo criando um ambiente interno iluminado naturalmente.

Por se tratar de um material que não possui transparência total, é esperado que a instalação do mesmo resulte na atenuação da irradiação que passa para o interior de uma edificação. De acordo com Liu et al. (2019), o uso de sistemas fotovoltaicos translúcidos sobre os vidros das janelas de uma edificação pode prejudicar o conforto visual dos ocupantes, o que pode levar a um aumento do uso de iluminação artificial. Por outro lado, o material fotovoltaico também atenua o ganho de calor para o interior do ambiente, reduzindo a demanda de carga térmica artificial. De acordo com Zhang et al. (2018), a aplicação de módulos fotovoltaicos

translúcidos instalados sobre as janelas de uma edificação pode reduzir o ganho de calor para o ambiente interno em mais de 45%, quando comparado com uma janela de vidro comum. Para Lu e Law (2012), a mesma aplicação pode reduzir em até 65% o ganho total de calor para o ambiente interno.

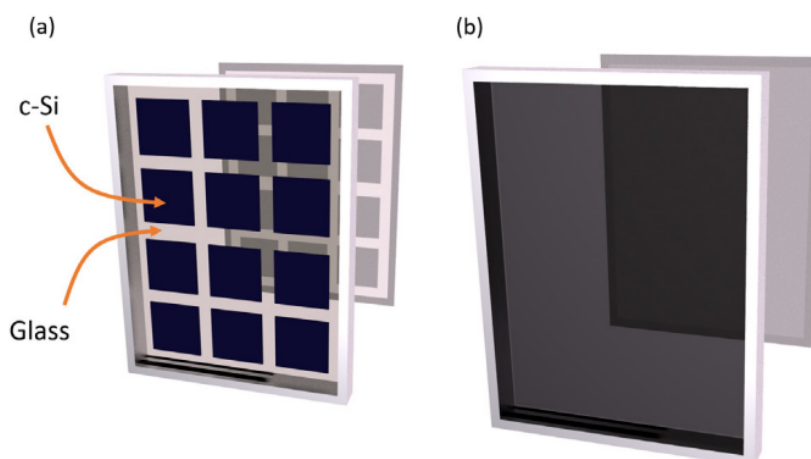
Quando aplicado às estufas agrícolas, o material fotovoltaico gera energia enquanto a irradiação transmitida é aproveitada para realização de fotossíntese. De acordo com Badji et al. (2022), cada planta possui um intervalo de comprimentos de onda atrelados à sua fotossíntese, e necessários para o desenvolvimento da planta. Por este aspecto, é importante estudar qual o espectro eletromagnético que ultrapassa a célula solar e incide sobre a planta. O estudo de Sun e Jasieniak (2017), mostra que o espectro de absorção do módulo fotovoltaico varia drasticamente dependendo do tipo de material utilizado. Portanto, o material deve ser escolhido considerando o espectro de absorção da planta que será cultivada, tendo em vista que se o pico de absorção do material fotovoltaico coincidir com o pico de absorção da planta, a célula solar irá absorver grande parte da energia espectral, prejudicando o desenvolvimento da planta.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 CÉLULAS SOLARES TRANSLÚCIDAS

Células solares translúcidas representam uma tecnologia que permite a geração de energia elétrica e o aproveitamento da irradiação que atravessa o material. Essa característica possibilita aplicações em diversas estruturas, bem como edificações e estufas agrícolas. Dependendo do material utilizado, podem ser classificadas como semiopacas ou semitransparentes. O presente trabalho utiliza um módulo semiopaco. Na Figura 1 podemos observar a distinção citada.

Figura 1 - Dispositivos fotovoltaicos semiopacos (a) e semitransparentes (b)

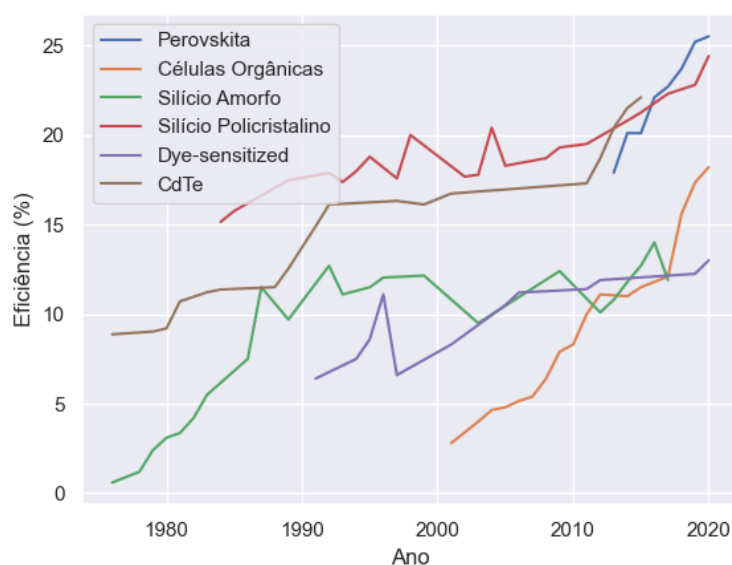


Fonte: Sun e Jasieniak (2017)

Dentre os diversos materiais apresentados por Sun e Jasieniak, 2017, que possuem a característica de transparência desejada e possibilitam a geração fotovoltaica, podemos ressaltar

o silício amorfo (a-Si), a perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ ) e as células orgânicas. Segundo os autores, o silício amorfo mostra-se como a opção mais utilizada atualmente, devido sua estabilidade e baixas temperaturas de fabricação. Todavia, células orgânicas e a base de perovskita têm demonstrado uma evolução rápida, quebrando recordes de eficiência e estabilidade a cada ano, tornando-as fortes candidatas para ampla comercialização em um futuro próximo. Na Figura 2 podemos observar a evolução da eficiência de conversão citada para diferentes materiais. Percebemos também que o a-Si possui eficiência inferior aos demais materiais, e tende a ficar ultrapassado quando as dificuldades de instabilidade dos materiais concorrentes forem superadas.

Figura 2 - Registros de maior eficiência obtida por material, a cada ano



Fonte: Elaborado pelo Autor com Dados Obtidos da NREL.

### 3.2 REDUÇÃO DA ENERGIA TRANSMITIDA

De acordo com Incropera e Dewitt (2013), podemos avaliar o comportamento energético de uma superfície através da lei de conservação de energia.

$$\frac{dE_{total}}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

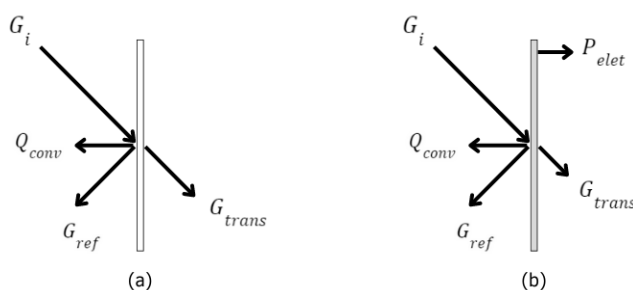
na qual  $\frac{dE_{total}}{dt}$  é a variação instantânea da energia total, diretamente ligada ao aumento da temperatura das células,  $q_{in}$  é a taxa de energia que entra no sistema e  $q_{out}$  é a taxa de energia que deixa o sistema, referente às parcelas refletidas, transmitidas e convertidas.

A soma das parcelas refletidas, transmitidas, convertidas e absorvidas pela célula solar deve ser igual a taxa de energia que entra no sistema, referente a radiação solar incidente. Assim, podemos reescrever a Equação 1 em função das variáveis associadas ao problema físico proposto.

$$G_i = mC_p \frac{dT}{dt} + G_{ref} + G_{trans} + Q_{conv} + P_{elet} \quad (2)$$

na qual  $G_i$  é irradiação solar incidente,  $m$  é a massa do objeto analisado,  $C_p$  o calor específico a pressão constante,  $\frac{dT}{dt}$  é a variação instantânea da temperatura,  $G_{ref}$  a irradiação solar refletida,  $G_{trans}$  é a irradiação solar transmitida para o ambiente interno,  $Q_{conv}$  é a taxa de energia cedida por convecção para o ambiente externo e  $P_{elet}$  é a potência gerada pelo material fotovoltaico translúcido. O balanço de energia na superfície, para antes e depois da instalação do módulo fotovoltaico, é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Balanço de energia antes da instalação do módulo fotovoltaico (a) e Após a Instalação (b)

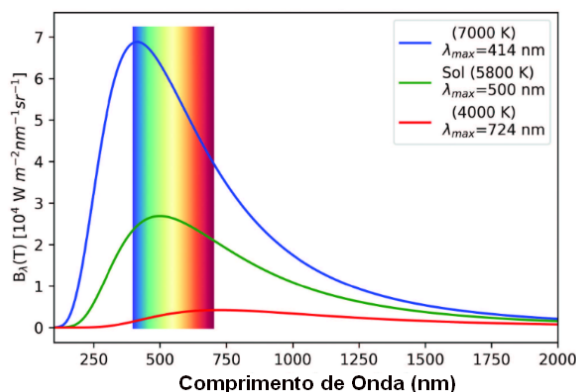


Fonte: o Autor.

### 3.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O espectro eletromagnético de uma onda é a distribuição de sua energia em diferentes comprimentos de onda ou frequências. Essa distribuição é geralmente representada por um gráfico que mostra a intensidade da radiação em função do comprimento de onda ou da frequência, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Irradiância Espectral do Corpo Negro para Diferentes Temperaturas



Fonte: Almeida e Hetem (2022). - Aspectos do Sol observados em diferentes faixas espectrais.

Como representação do comportamento espectral solar, utiliza-se a equação de Planck para irradiância monocromática para temperatura de 5800K, de acordo com a Equação 3

$$E_{\lambda,T}(\lambda, T) = \frac{2hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (3)$$

na qual  $E_{\lambda,T}$  é poder emissivo para o comprimento de onda e temperatura do corpo negro,  $\lambda$  é o comprimento de onda analisado,  $T$  a temperatura de corpo negro (5800 K para o Sol),  $c$  é a velocidade da luz,  $h$  a constante de Planck,  $k$  é constante de Boltzmann e  $e$  o número de Euler.

## 4 METODOLOGIA

Com o objetivo de compreender o comportamento espectral da onda que atravessa o material fotovoltaico, construiu-se um espectrômetro utilizando sensores fotossensíveis e um microcontrolador. O instrumento é construído, calibrado, validado e então, realizam-se as medições envolvendo a célula solar.

O módulo fotovoltaico, que possui três áreas com transparência distintas, é posicionado perpendicularmente à irradiação solar, cujo espectro é conhecido. Para isso, montou-se uma estrutura de suporte para o módulo fotovoltaico com grau de liberdade no eixo central, permitindo seu posicionamento em direção ao sol. Os valores obtidos com o espectrômetro para cada área que compõem o módulo são apresentados e discutidos.

### 4.1 CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO

O dispositivo consiste em circuito acoplado a uma caixa de madeira pintada com tinta preta fosca. Em seu interior, um sensor espectral modelo AS7341 é responsável pelas medições de irradiação incidente e se comunica com um microcontrolador NodeMCU através de uma interface serial I<sup>2</sup>C. O controlador é energizado por uma porta USB, na qual disponibiliza os dados para leitura em um computador.

Para medição e análise dos dados, dois algoritmos foram desenvolvidos neste trabalho. O primeiro se trata do código carregado no NodeMCU, responsável pela leitura dos dados do sensor e disponibilização dos mesmos na porta serial USB. Desenvolvido no Arduino IDE, o algoritmo utiliza a biblioteca disponibilizada pelo fabricante do sensor, facilitando a obtenção das medições e a calibração do dispositivo. O segundo algoritmo é desenvolvido em Python e é responsável pela leitura dos dados na porta serial do computador e pela geração de gráficos da curva espectral em tempo real. Os algoritmos desenvolvidos são complementares e devem ser executados em conjunto.

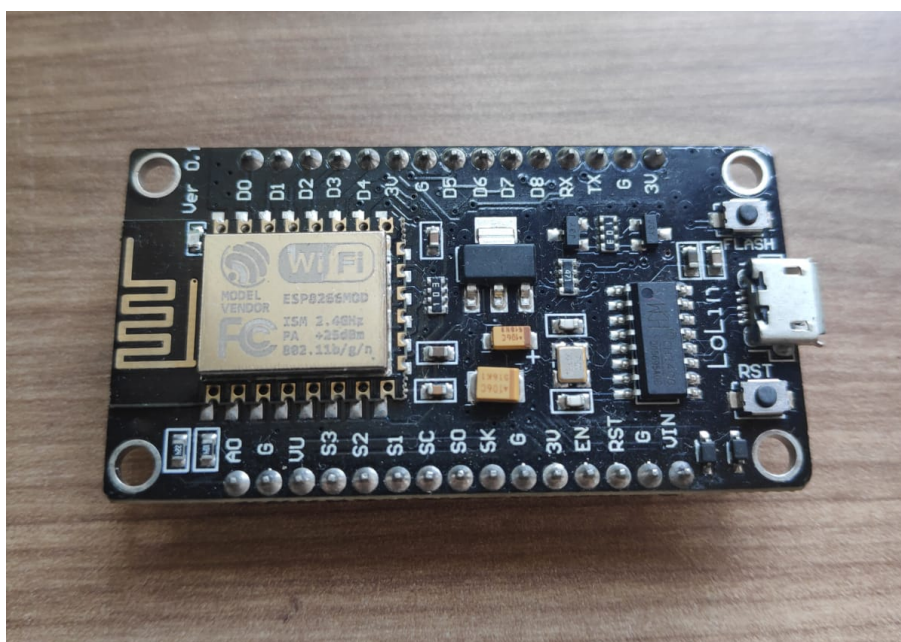
#### 4.1.1 NODEMCU

O NodeMCU é uma placa de desenvolvimento para *IoT* (Internet das Coisas) baseada no microcontrolador ESP8266. Ele é uma plataforma de *hardware* em código aberto a qual permite que os desenvolvedores criem soluções para a *IoT* de forma rápida e fácil. O NodeMCU é projetado para trabalhar com a linguagem de programação Lua, mas também pode ser programado usando a linguagem Arduino, que é o caso deste trabalho. O dispositivo pode ser observado na Figura 5.

Para a construção do espectrômetro, é necessário programar o NodeMCU através de uma porta USB. O algoritmo desenvolvido para este fim é responsável por realizar leituras periódicas

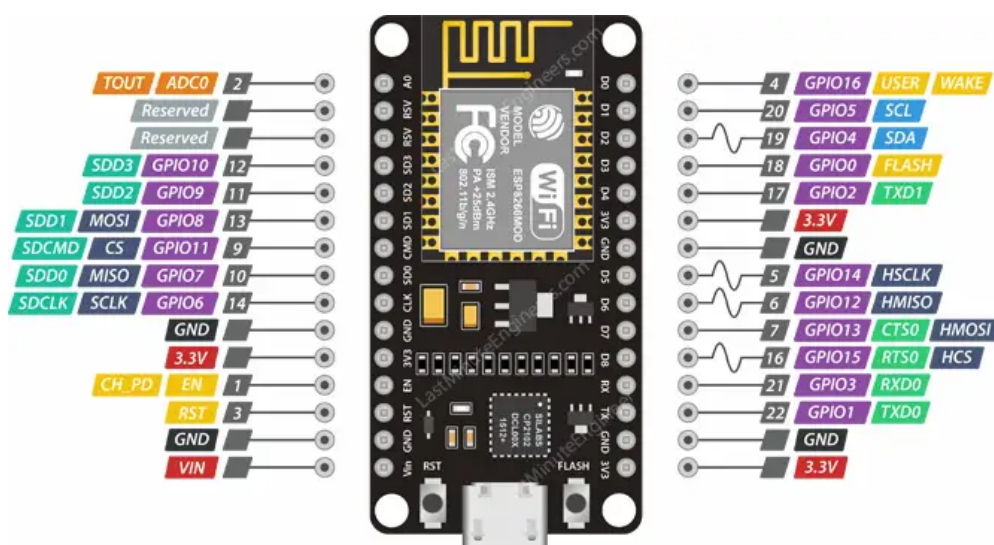
do sensor espectral AS7341 e disponibilizar os dados obtidos através da comunicação serial, direcionando-os para a porta USB do computador. Visto que o sensor espectral utiliza comunicação I<sup>2</sup>C, é crucial consultar o *datasheet* do NodeMCU para identificar os pinos utilizados nos sinais de dados (SDA) e de *clock* (SCL). Na Figura 6, podemos observar que os pinos GPIO 4 e GPIO 5 são os responsáveis por estes sinais, respectivamente.

Figura 5 - Placa de desenvolvimento NodeMCU



Fonte: o Autor.

Figura 6 - Pinos da Placa NodeMCU



Fonte: Características do NodeMCU - Capsistema



#### 4.1.2 SENSOR ESPECTRAL AS7341

O AS7341 é um sensor espectral analógico que pode detectar cores com alta precisão. Ele opera por meio de um conjunto de fotodiodos com filtros ópticos integrados, que são calibrados para detectar comprimentos de onda específicos. O sensor é composto por 10 canais de detecção, que cobrem uma faixa de comprimento de onda de 400 a 750 nm, incluindo o espectro de luz visível e parte do infravermelho. O dispositivo pode ser observado na Figura 7.

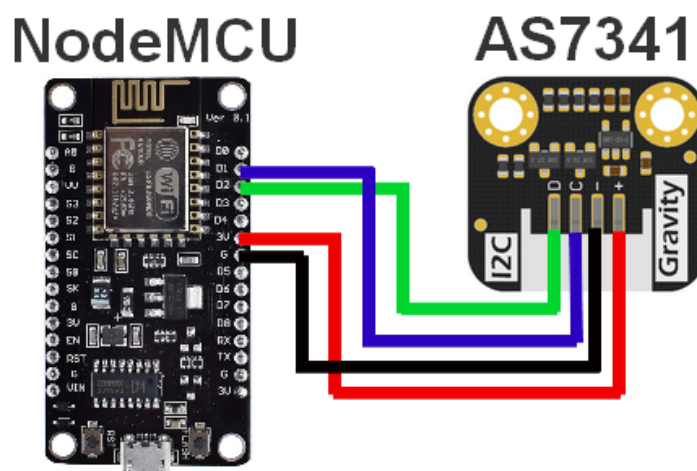
Figura 7 - Sensor DFRobot AS7341



Fonte: o Autor.

O sensor é controlado por uma interface serial  $I^2C$  e pode ser facilmente integrado a microcontroladores e sistemas embarcados. Ele é capaz de medir a intensidade de cada faixa de comprimentos de onda em tempo real. Para a comunicação  $I^2C$  com o NodeMCU utilizam-se quatro fios, dois para alimentação e dois para transferência de dados. O diagrama de conexão entre os dispositivos é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Conexão entre NodeMCU e sensor AS7341



Fonte: o Autor.

O AS7341 também possui recursos para compensar a temperatura e o envelhecimento do sensor, buscando manter a precisão e estabilidade ao longo do tempo. É uma solução confiável e de baixo custo para medir a intensidade da luz em diferentes comprimentos de onda, permitindo o monitoramento em tempo real de uma ampla gama de fontes de luz.

### 4.1.3 ARDUINO IDE E BIBLIOTECAS

Arduino IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado que permite programar placas microcontroladoras compatíveis com Arduino. É uma ferramenta de fácil entendimento para quem deseja desenvolver projetos de *IoT*, pois oferece uma interface intuitiva que simplifica o processo de programação e teste de projetos. Para auxiliar no desenvolvimento de projetos, utiliza-se bibliotecas do Arduino IDE, que são conjuntos de códigos pré definidos, utilizados para acelerar o desenvolvimento de projetos. As bibliotecas contêm funções pré-programadas, permitindo que programadores usem códigos já existentes, em vez de ter que escrever todo o algoritmo.

O fabricante do sensor espectral *DFRobot* AS7341, adquirido para este trabalho, disponibiliza uma biblioteca para o Arduino IDE que facilita a leitura da irradiação espectral incidente no sensor. O trecho de código pré existente na biblioteca realiza a leitura dos 10 canais do sensor, cada um responsável pela medição em uma faixa de comprimentos de onda distintos. Para a representação de cada canal, utiliza-se o comprimento de onda médio da faixa associada. O nome do canal, a faixa de leitura e o comprimento de onda médio podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações dos canais do sensor AS7341.

Canal	Comprimento de Onda (nm)	Comprimento de Onda Médio (nm)
F1	405-425	415
F2	435-455	445
F3	470-490	480
F4	505-525	515
F5	545-565	555
F6	580-600	590
F7	620-640	630
F8	670-690	680

Utilizando o Arduino IDE e a biblioteca AS7341, desenvolve-se um algoritmo para o NodeMCU. O código é responsável por realizar a leitura do sensor a cada segundo e escrever as medições no barramento serial, separadas por vírgula. A separação dos dados por vírgula facilita a interpretação dos valores lidos posteriormente no Python.

### 4.1.4 LEITURA DOS DADOS NO PYTHON

Python é uma linguagem de programação que possui uma sintaxe simples e clara, utilizada para uma infinidade de aplicações. Possui uma grande comunidade de desenvolvedores e um vasto conjunto de bibliotecas e ferramentas disponíveis para facilitar o desenvolvimento de

projetos. Neste trabalho, o algoritmo desenvolvido utiliza de forma auxiliar as bibliotecas PySerial e Seaborn.

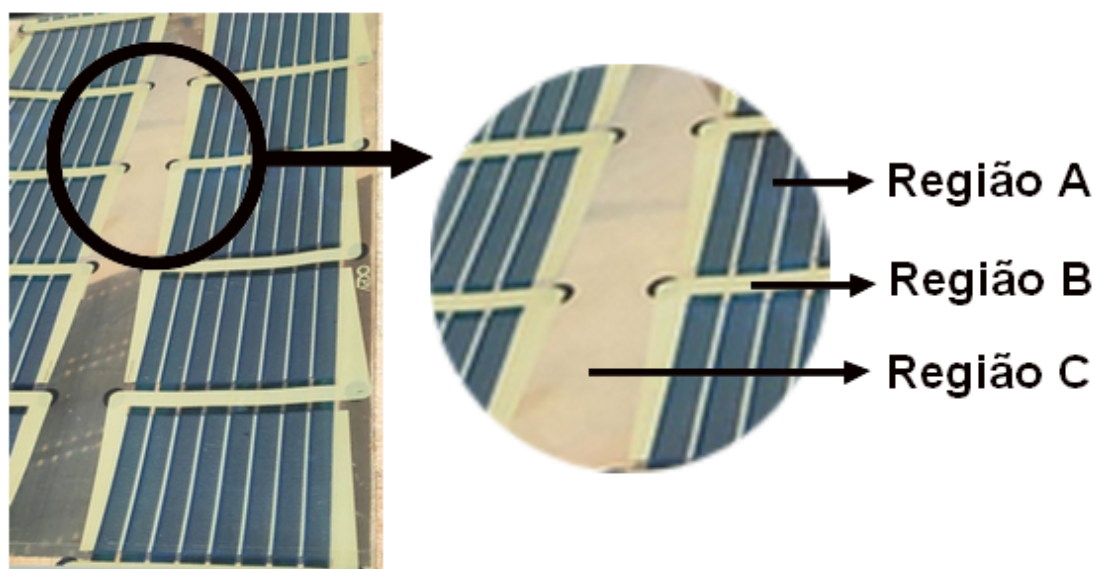
Como o NodeMCU é programado para enviar os dados via USB, utilizamos a biblioteca PySerial para facilitar a comunicação serial com o dispositivo. A informação é lida em formato de *string*, sendo necessário uma pequena manipulação para separar o valor de cada canal do sensor. Por esse motivo, o NodeMCU é programado para separar os valores com vírgulas ao enviar para a porta serial, facilitando a interpretação dos dados no Python. Ao final, espera-se a obtenção de um vetor de dados, onde cada valor é referente a leitura da intensidade de uma faixa de comprimentos de onda específica.

Com o vetor de dados da intensidade espectral definido, utiliza-se a biblioteca Seaborn para gerar gráficos de forma prática. O gráfico resultante é customizável, sendo possível associar as cores das barras à cor referente de cada comprimento de onda. Dentro das funcionalidades disponíveis, a biblioteca permite realizar atualizações periódicas nos valores do gráfico, permitindo a visualização em tempo real. Assim, a visualização é atualizada a cada segundo, em conjunto com o envio das medições por parte do NodeMCU.

## 4.2 CÉLULA SOLAR SEMIOPACA

O material fotovoltaico utilizado neste trabalho foi fornecido pela Profa. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues. Trata-se de uma célula solar orgânica semiopaca e flexível, produzida sob demanda pela empresa *InfinityPV*. O módulo é composto por materiais de diferentes características, sendo possível definir sua área em três regiões de colorações e transparências distintas: Região A, de coloração azulada e onde ocorre o efeito fotoelétrico, Região B, de coloração dourada na qual estão contidos os condutores da célula e Região C, incolor e translúcida. As regiões citadas podem ser observadas na Figura 9.

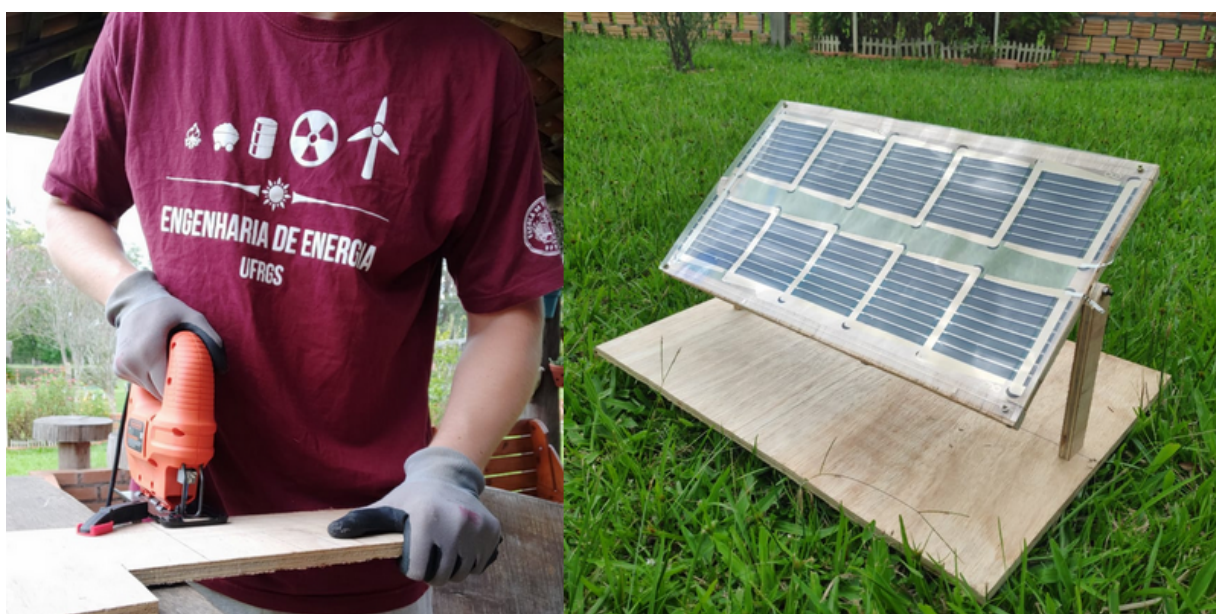
Figura 9 - Regiões que compõem a célula orgânica.



Fonte: o Autor.

Para garantir que a célula solar não se movimente é necessário manter o módulo fotovoltaico fixo durante o experimento. Para isso, montou-se uma estrutura de suporte em madeira, com grau de liberdade para poder girar em direção ao sol. Utilizou-se o compensado naval como material, tendo em vista seu baixo custo e durabilidade. Os cortes são realizados com o auxílio de uma serra sabre. Na Figura 10 pode-se observar o processo de construção e a estrutura final do suporte. O suporte é constituído de uma base de 80 centímetros de largura e 60 centímetros de comprimento. Já as estacas laterais, que sustentam e permitem a rotação da célula, possuem dimensões de 5 centímetros de largura e 25 centímetros de comprimento. Todas as peças possuem espessura de 2,5 centímetros.

Figura 10 - Processo de construção (esquerda) e suporte instalado (direita)



Fonte: o Autor.

### 4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os valores lidos no experimento são apresentados em termos do poder emissivo espectral normalizado (PEEN). Na prática, utiliza-se o canal de maior leitura do sensor como “100%” e os demais são ajustados à escala.

Antes de realizar as medições do experimento envolvendo o módulo fotovoltaico semiopaco, é necessário validar os valores lidos pelo espectrômetro e realizar a calibração do dispositivo. Para observar a resposta dos diferentes canais do sensor espectral, utiliza-se lâmpadas LED de cores bem definidas: azul, verde, amarelo e vermelho. O objetivo é observar a resposta do dispositivo para cada cor do espectro individualmente e avaliar se o sensor acusa medidas em faixas coerentes com a lâmpada utilizada.

Verificando que o comportamento do dispositivo está de acordo com o esperado, calibra-se o espectrômetro de acordo com o espectro solar. Como representação do comportamento espectral solar ideal, utilizou-se a equação de Planck (Eq. 3), assumindo temperatura de corpo negro de 5800K. Visando ajustar o comportamento espectral obtido pelo espectrômetro ao comportamento teórico do espectro solar, realizou-se ajustes finos no ganho



individual dos canais de leitura do sensor. Após calibração, mediu-se a irradiância espectral de lâmpadas LED com espectros eletromagnéticos conhecidos. Comparou-se os perfis obtidos com os disponibilizados pelo fabricante.

Com o equipamento calibrado, iniciou-se as medições da irradiação transmitida pela célula fotovoltaica em cada uma das três regiões. Obteve-se o comportamento espectral de cada região e analisou-se os dados de atenuação da irradiação cada comprimento de onda, quando comparados ao espectro solar incidente. Por fim, os resultados foram avaliados e discute-se quais aplicações foram comprometidas com a utilização do módulo fotovoltaico semiopaco em questão.

## 5 RESULTADOS

A sessão discute os resultados obtidos com o experimento. A estrutura do espectrômetro, com o sistema de sensoriamento acoplado, pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Espectrômetro e sistema de sensoriamento



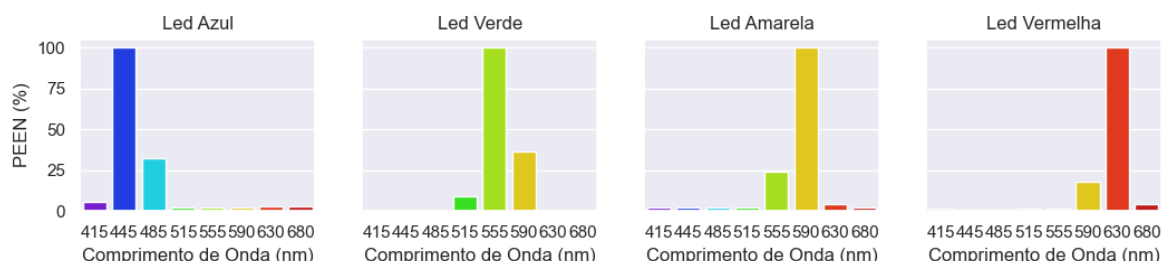
Fonte: o Autor.

### 5.1 VALIDAÇÃO PRÉVIA DA LEITURA DO ESPECTRÔMETRO

Verificar os valores conhecidos de um sensor antes das medições é uma forma de validar se o sensor está funcionando corretamente. A validação é essencial para verificar a confiabilidade das medições, especialmente quando se trabalha com equipamentos novos ou desconhecidos.

Primeiramente, obtém-se medições da irradiação para cada comprimento de onda em quatro lâmpadas LED coloridas. O resultado pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Leitura normalizada do espectrômetro para quatro lâmpadas de cores distintas.



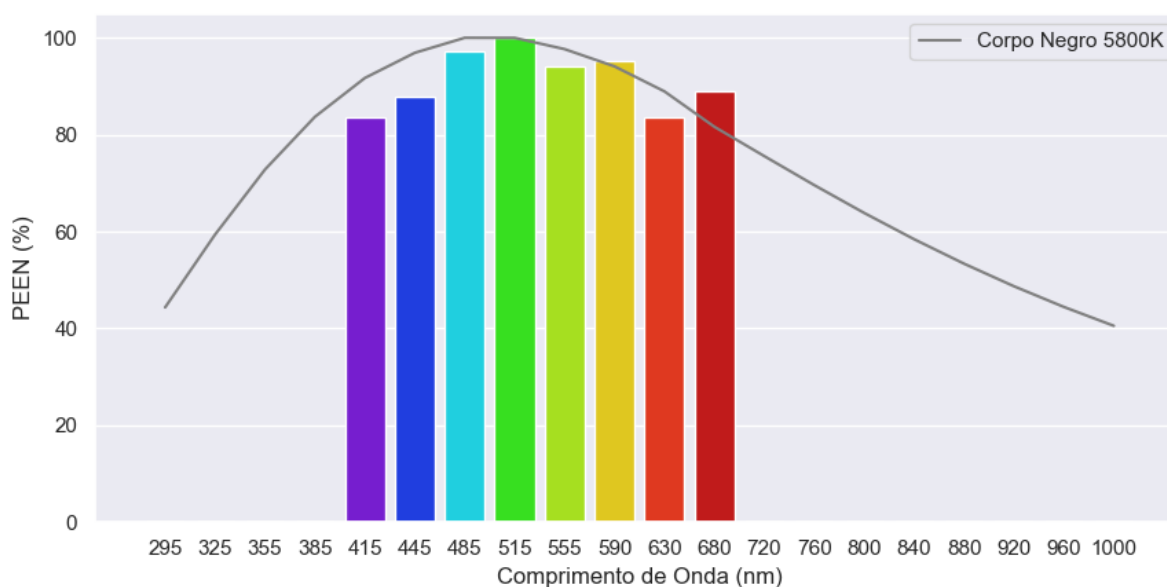
Fonte: o Autor.

É possível observar que o dispositivo consegue identificar de forma nítida a cor de uma lâmpada quando se trata de coloração única. Mais do que isso, confirma-se que os canais lidos estão corretamente associados aos seu respectivo comprimento de onda.

## 5.2 CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O ESPECTRO SOLAR TEÓRICO

Primeiramente, observa-se os valores que são lidos pelo espectrômetro, antes da calibração, quando apontado em direção ao sol. Os resultados são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Espectro Eletromagnético do Sol pré-calibração

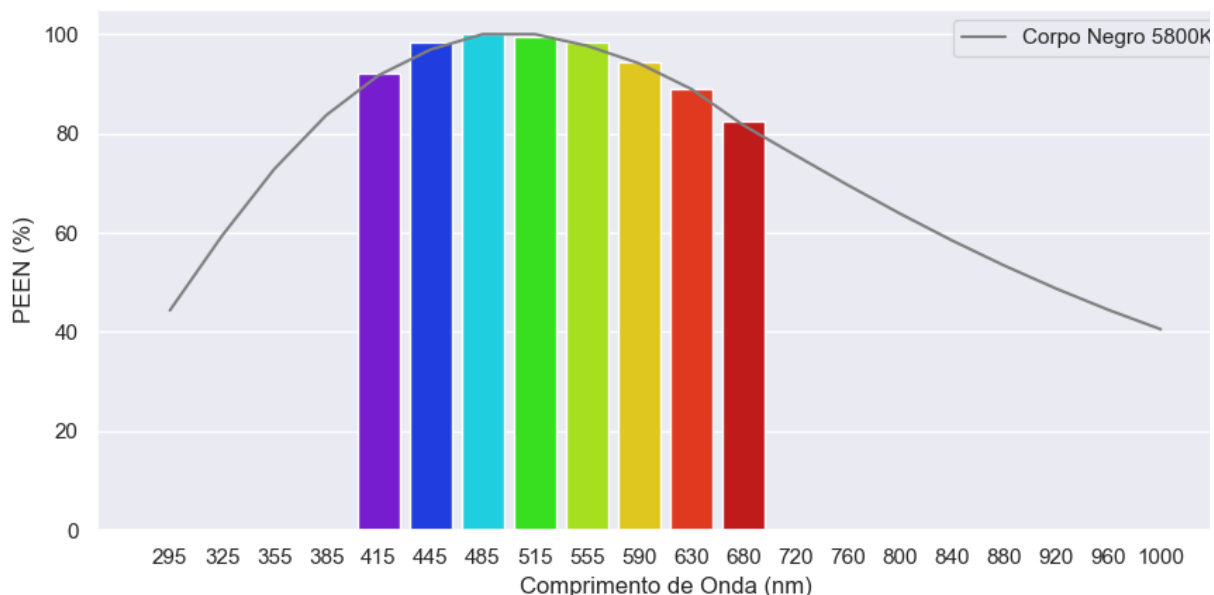


Fonte: o Autor

Conhecendo o valor esperado teórico e o valor lido pelo espectrômetro em cada comprimento de onda, calcula-se, através da razão entre os dois valores, o ganho a ser aplicado em cada canal do sensor para ajustar a curva ao esperado. Após a realização do ajuste fino,

mede-se novamente os valores pós-calibração do dispositivo. Os resultados são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Espectro Eletromagnético do Sol pós-calibração



Fonte: o Autor.

Percebe-se que mesmo após calibração, as novas medições apontaram pequenas divergências em algumas faixas de comprimento de onda. Com objetivo de estimar a faixa de incerteza, cinquenta medições foram realizadas em um intervalo de sete minutos para calcular a média e o desvio padrão dos valores lidos observados em cada canal do sensor. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

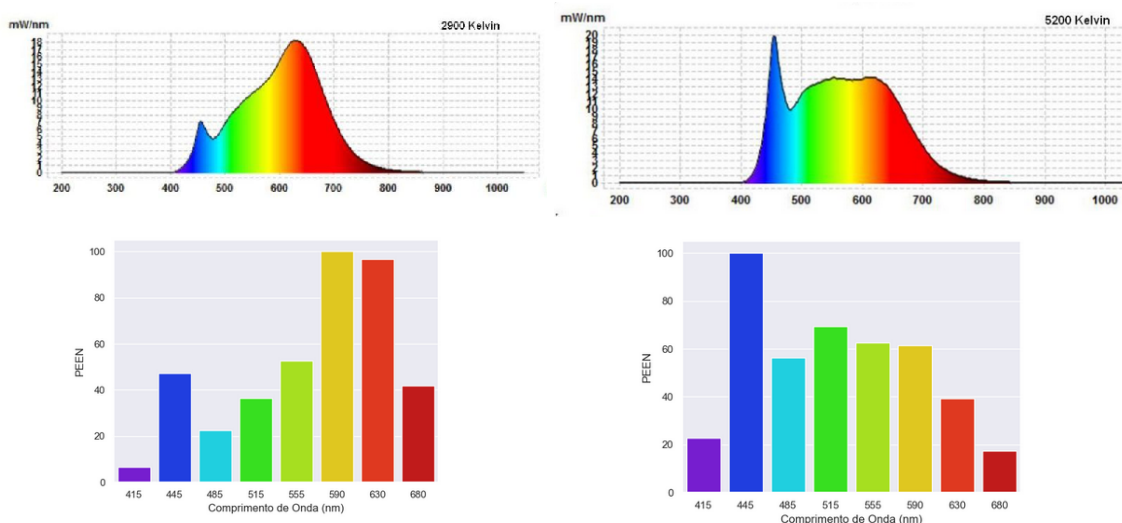
Tabela 2 - Faixa de incerteza dos valores lidos pelo sensor espectral.

Canal	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
$\lambda_{\text{médio}} (nm)$	415	445	485	515	555	590	630	680
PEEN (%)	92 ± 2,9	98 ± 2,4	99 ± 1,7	100 ± 1,6	98 ± 2,1	94 ± 2,9	88 ± 2,3	82 ± 3,1

### 5.3 VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO UTILIZANDO ESPECTROS CONHECIDOS

Com intuito de avaliar a confiabilidade do dispositivo, mediu-se os dados de duas lâmpadas LED com comportamento espectral conhecidos: 2900 K e 5200 K. Os resultados são apresentados na Figura 15, sendo o espectro de 2900 K a esquerda e o de 5200 K a direita. O espectro disponibilizado pelo fabricante encontra-se na parte de cima da Figura, enquanto os valores lidos pelo espectrômetro encontram-se na parte inferior.

Figura 15 - Intensidade espectral de lâmpada 2900K (esquerda) e 5200K (direita)



Fonte: Pornatur24 - LED full spectrum DuoLight (acima) e o Autor(abaixo).

Os valores observados pelo espectrômetro estão de acordo com o esperado. Quando comparado com o espectro fornecido pelo fabricante das lâmpadas pequenas diferenças ocorrem, visto que o sensor espectral possui certa margem de incerteza e trabalha em faixas discretas, enquanto o fabricante utiliza um instrumento com altíssima confiabilidade e trabalha dentro do espectro contínuo.

Em geral, mesmo diante da simplicidade construtiva do instrumento e baixo custo do sensor utilizado, o espectrômetro desenvolvido neste trabalho apresentou resultados coerentes quando comparado aos dados do fabricante das lâmpadas.

#### 5.4 ESPECTRO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SEMIOPACO

Após a calibração e validação dos resultados obtidos com o espectrômetro construído, realizou-se a medição do espectro eletromagnético em cada uma das três regiões do módulo semiopaco. Os resultados podem ser observados na Figura 16. O comportamento espectral das regiões A e B são também apresentadas com escala ampliada na Figura 17 para facilitar a visualização.

Como citado na seção 4.3, utiliza-se o comprimento de onda do Sol de maior intensidade para normalizar as curvas e facilitar a comparação. Todos os demais valores são calculados referentes à leitura do canal de 515 nm (100%). Os valores são apresentados na Tabela 3, na qual PEEN é o poder emissivo espectral normalizado e  $\Delta E_{sol}$  a variação entre o valor obtido na região em relação ao mesmo comprimento de onda do Sol.

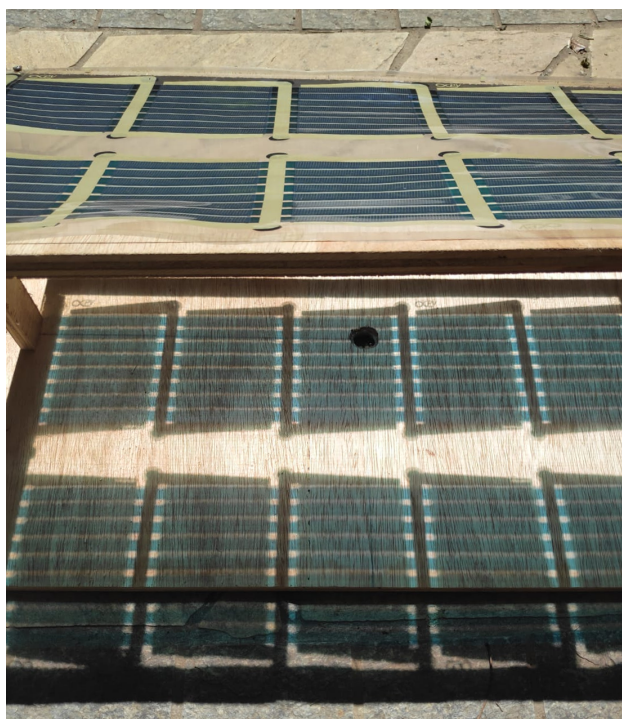
É possível observar na Figura 17 que as Regiões A e B apresentam forte atenuação em todo espectro. Isso se deve à baixa transparência das regiões, fato que pode ser observado no sombreamento produzido pela célula na base de madeira, como apresentado na Figura 18.





415 nm	91,70 %	0%	4,43 %	-95,17%	3,79 %	-95,86%	68,93 %	-24,83%
445 nm	96,90 %	0%	7,68 %	-92,07%	3,55 %	-96,34%	82,13 %	-15,24%
485 nm	99,89 %	0%	8,45 %	-91,55%	3,38 %	-96,62%	83,11 %	-16,89%
515 nm	100,00 %	0%	4,68 %	-95,32%	3,96 %	-96,04%	58,27 %	-41,73%
555 nm	97,66 %	0%	3,48 %	-96,44%	3,25 %	-97,67%	70,06 %	-28,27%
590 nm	94,10 %	0%	2,59 %	-97,25%	2,59 %	-97,25%	80,93 %	-13,99%
630 nm	88,93 %	0%	2,10 %	-97,64%	2,10 %	-97,64%	72,91 %	-18,01%
680 nm	81,63 %	0%	5,93 %	-92,73%	6,34 %	-92,23%	63,22 %	-22,56%
Média	93,86 %	0%	4,91 %	-94,77%	3,62 %	-96,08%	72,44 %	-22,69%

Figura 18 - Intensidade espectral transmitida em cada região do módulo semiopaco.



Fonte: o Autor.

Devido às características do material, a região A apresentou maior poder emissivo espectral nos menores comprimentos de onda, como pode ser observado na Figura 17. Os comprimentos de onda de 445 e 485 nm apresentaram poder emissivo espectral normalizado de 7,68% e 8,45%, respectivamente, enquanto a média da região foi de 4,91%. O resultado está de acordo com o esperado, tendo em vista a coloração azulada observada no sombreamento da célula, coerente com a intensidade identificada nos comprimentos de onda menores. Parte da energia absorvida, que ocasiona o aquecimento do material, resulta em um aumento no poder emissivo próximo a faixa do infravermelho.

A Região B apresenta uma absorção uniforme do espectro. O maior PEEN foi de 6,34% no comprimento de onda de 680 nm, próximo do infra vermelho. Sua baixa transparência resulta na maior atenuação observada, com média de -96,08%. Quando comparado à Região 1, ocorre um aumento ainda maior no poder emissivo próximo do infravermelho, cujo acréscimo é proporcional à energia absorvida.

A intensidade espectral que atravessa a região C, apesar desta possuir maior transparência que as outras regiões, também é atenuada. Parte da irradiação incidente é refletida, como apresentado na Figura 19, contribuindo para o resultado observado. O comprimento de onda mais afetado foi o de 515 nm, com variação de -41,73%.

Figura 19 - Reflexão da irradiação incidente no módulo semiopaco.



Fonte: o Autor.

## 6 CONCLUSÃO

O espectrômetro construído neste trabalho, apesar de sua simplicidade construtiva, mostrou-se apto para a análise proposta. A calibração do dispositivo utilizando o espectro solar teórico, simulado pelo poder emissivo de um corpo negro de 5800 K, mostrou-se como uma abordagem válida, visto que os valores pós-calibração se ajustam as curvas de irradiação fornecidas pelos fabricantes das lâmpadas utilizadas como comparação. O equipamento é capaz de identificar cores individuais de lâmpadas, bem como o espectros eletromagnéticos complexos, formados por toda faixa visível.

A célula solar orgânica em questão apresentou baixa transparência, fato que pode ser previamente presumido ao observar o forte sombreamento provocado pelo módulo. Diretamente proporcional à quantidade de energia absorvida do espectro e ao aumento da temperatura, ocorre o deslocamento do poder emissivo espectral para as faixas próximas do infravermelho. A

composição material da região de coloração azulada resulta em um pico de energia próximo dos 485 nm, coerente com a cor azul observada fisicamente.

De acordo com os resultados obtidos é possível aferir que o módulo em questão não possui uma composição material que traga transparência significativa, tornando inviável sua utilização em janelas de edificações ou em estufas agrícolas. O aproveitamento de uma baixa quantidade de luz solar não é suficiente para as atividades internas da edificação, sendo necessária a utilização de iluminação artificial, tampouco para cultivo de hortaliças em estufas, que terão seu processo de fotossíntese prejudicado. O módulo em questão é propício para ser utilizado em locais que usufruam de suas características maleáveis, ou que necessitem sombreamento intenso mas não total, como um estacionamento.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de células solares com alta transparência, caso já estejam disponíveis para comercialização. Ademais, seria interessante conectar diferentes cargas ao módulo, identificando a influência do efeito fotoelétrico nos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. e HETEM, J. **Aspectos do Sol observados em diferentes faixas espectrais**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 44, São Paulo , 2022.

BADJI, A. *et al.* Design, technology, and management of greenhouse: A review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 373, 2022.

INCROPERA, F.P. e DEWITT, D.P., **Fundamentos de transferência de Calor e Massa**, LTC-Livros Técnicos e Científicos ,São Paulo, 5a Edição, 2013.

LIU D, SUN Y., WILSON R. e Wu Y., **Comprehensive evaluation of window-integrated semi-transparent PV for building daylight performance**, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering, The University of Nottingham, Reino Unido, 2019.

LU, L. e LAW, M. **Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong**, Renewable Energy Research Group, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, China, 2012.

NREL, **Best Research-Cell Efficiency Chart**, NREL Research-cell efficiency data, 2023.

SUN, J. e JASIENIAK, J. Semi-transparent solar cells, **Journal of Physics D: Applied Physics**, Volume 50, 2017.

ZHANG *et. al.* **Investigation on the energy performance of a novel semi-transparent BIPV system integrated with vacuum glazing**, Renewable Energy Research Group (RERG), Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2018

## APÊNDICE A - Algoritmo desenvolvido em Python.

```

import serial #Importa a biblioteca
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.animation import FuncAnimation
import os, time
entrada = 'COM4'
dataList = []
savingOn = False
showClear = False
showNIR = False
def getNodeMcuData():
    global arduino, dataList, savingOn
    try:
        msg = str(arduino.readline())
    except:
        connectNode()
        return
    msg = msg[2:-5] #Fatia a string
    data = msg.split(',')
    arduino.flush() #Limpa a comunicação
    method = data[0]
    if method == 'read' and savingOn:
        createTxtFile(dataList)
        dataList = []
        savingOn = False
    if method == 'save':
        dataList.append(msg)
        savingOn = True
    return data
def createTxtFile(data):
    i = 1
    while os.path.exists(f'Results{i}.txt'):
        i += 1

    with open(f'Results{i}.txt', 'w') as file:
        for item in data:
            file.write(item+'\n')
def updateGraphLoop(i):
    global y, rawdata
    try:
        data = getNodeMcuData()
        print(data)
        y = data[1:]
        y = [int(value) for value in y]
        if not showClear:
            y.pop(8) #Elimina o Clear
        if not showNIR:
            y.pop() #Elimina ultimo elemento

        print(y)
        rawdata = {
            'Comprimento de Onda (nm)': x,

```

```

        'Leitura do Sensor Normalizada': y
    }

    except:
        print('Except pass')
        return
plt.cla()
sns.barplot(data=rawdata, x='Comprimento de Onda (nm)', y='Leitura do Sensor Normalizada',
ax=ax, palette=colors)
def connectNode():
    global arduino
    while True: #Loop para a conexão com o Arduino
        try: #Tenta se conectar, se conseguir, o loop se encerra
            arduino = serial.Serial(entrada, 115200)
            print('\nArduino conectado')
            break
        except:
            print(f'Aguardando conexão na entrada {entrada}...')
            time.sleep(1)

connectNode()
x = [415, 445, 485, 515, 555, 590, 630, 680]
y = [0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5]
if showClear:
    x.append('Clear')
    y.append(0.5)
if showNIR:
    x.append('NIR')
    y.append(0.5)
rawdata = {
    'Comprimento de Onda (nm)': x,
    'Leitura do Sensor Normalizada': y
}
fig, ax = plt.subplots()
sns.set_theme()
colors = ['#7600ed', '#0028ff', '#00eaff', '#1fff00', '#b3ff00', '#ffdf00', '#ff2100',
'#db0000', '#610000', '#610000']
sns.barplot(data=rawdata, x='Comprimento de Onda (nm)', y='Leitura do Sensor Normalizada',
ax=ax, palette=colors)
anim = FuncAnimation(fig=fig, func=updateGraphLoop, interval=800)
plt.show()

```

**APÊNDICE B** - Algoritmo desenvolvido em Arduino.

```
#include "DFRobot_AS7341.h"
#define BUTTON_PIN 16
DFRobot_AS7341 as7341;
void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);
  while (as7341.begin() != 0) {
    Serial.println("I2C falhou. Verifique os conectores.");
    delay(1000);
  }
  pinMode(BUTTON_PIN, INPUT);
as7341.setAGAIN(2);
}
void loop(void)
{
  DFRobot_AS7341::sModeOneData_t data1;
  DFRobot_AS7341::sModeTwoData_t data2;
  as7341.startMeasure(as7341.eF1F4ClearNIR);
  data1 = as7341.readSpectralDataOne();
  as7341.startMeasure(as7341.eF5F8ClearNIR);
  data2 = as7341.readSpectralDataTwo();
  if(digitalRead(BUTTON_PIN)) {
    Serial.print("save");
    Serial.print(",");
  }else{
    Serial.print("read");
    Serial.print(",");
  }
  Serial.print(data1.ADF1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data1.ADF2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data1.ADF3);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data1.ADF4);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADF5);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADF6);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADF7);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADF8);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADCLEAR);
  Serial.print(",");
  Serial.print(data2.ADNIR);
  Serial.print("\r\n");
  delay(800);
}
```