

PESQUISA E CONCEITUAÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO ÓPTICO

RESEARCH AND CONCEPTUALIZATION OF AN OPTICAL
SPECTROMETER

EDIVANILSON FERREIRA DOS SANTOS

edivanilson1604@gmail.com

YGO NETO BATISTA

ygo@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Segundo Ferreira (2012) a resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico é sua capacidade de converter a radiação incidente de determinadas faixas do espectro em energia elétrica. Portanto, ao analisarmos a resposta espectral de um tipo de célula fotovoltaica, podemos definir qual a faixa de radiação a qual a célula fotovoltaica trabalha de modo mais eficiente. Se analisarmos os dados da ASTM G173-03 (2003), a maior parte da radiação solar que chega na superfície terrestre, está localizada na faixa de 300 nm a 2000 nm. Porém, essa radiação pode variar de acordo com a região, data e hora, devido a diversos fatores, como mostra Bird (1981). Existem equipamentos, espectrômetros, capazes de realizar medições para construir o espectro da radiação solar. O objetivo desse artigo é a pesquisa básica e aplicada, bem como a conceituação para a construção de um espectrômetro de baixo custo, o qual mede faixas específicas da radiação e, a partir de bases de conhecimento, estima o espectro solar incidente na superfície terrestre. Com a técnica proposta neste trabalho é possível reduzir os pontos analisados do espectro e reduzir a precisão dos sensores a fim de reconstruir o espectro solar. Isto é, há uma diminuição no investimento em hardware devido a uma aplicação das bases de conhecimento. O espectro estimado poderá ser aplicado para análise das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, para definir qual tecnologia é a mais eficiente naquele local, em determinada condição atmosférica.

Palavras-chave: resposta espectral. célula fotovoltaica. usina solar. eficiência energética. radiação solar.

ABSTRACT

According to Ferreira (2012) the spectral response of a photovoltaic device is its ability to convert the incident radiation from certain bands of the spectrum in electrical energy. Therefore, when analyzing the spectral response of a kind of photovoltaic cell, we can define which range of radiation the photovoltaic cell works most efficiently. If we analyze the data from ASTM G173-03 (2003), most of the solar radiation that reaches the Earth's surface is located in the range from 300 nm to 2000 nm. However, this radiation can vary according to the region, date and time due to several factors, as shown by Bird (1981). There is equipment, spectrometers, capable of making measurements to build the spectrum of solar radiation. The objective of this article is basic and applied research, as well as the concept for the construction of a low-cost spectrometer, which measures specific ranges of radiation and, based on knowledge bases, estimates the incident solar radiation spectrum. By way of the proposed technique in this work, it is possible to reduce the number of analyzed points from the spectrum and reduce the accuracy of the sensors in order to estimate the solar spectrum. In other words, there is an exchange between investment in hardware by applying the knowledge bases. The estimated spectrum can be applied to analyze the different photovoltaic cell technologies, in order to define which technology is the most efficient in that location, for a given atmospheric condition.

Keywords: Spectral Response. Photovoltaic Cell. Photovoltaic plant. Energy efficiency. Solar radiation.

1 INTRODUÇÃO

Através da resposta espectral é possível identificar a faixa de radiação para qual a célula fotovoltaica funciona de modo mais eficiente. Se analisarmos o espectro padrão definido pela Sociedade Americana de Testes e Materiais no documento ASTM G173-03 (ASTM, 2003), a maior parte da radiação solar que chega na superfície terrestre, está localizada na faixa de 300 nm a 2000 nm (do ultravioleta ao infravermelho). Contudo, tal espectro não é constante em todo globo terrestre, ou a qualquer hora do dia, visto que a composição atmosférica e o ângulo de incidência podem alterar significativamente o espectro de radiação incidente na superfície terrestre. Em paralelo, dependendo da tecnologia utilizada, as células fotovoltaicas apresentam diferentes respostas espectrais. A combinação desses dois fatores, o espectro da radiação solar incidente e a tecnologia do painel solar, impacta na eficiência global do sistema de conversão de energia solar em elétrica. Portanto, conhecer o espectro solar da região é relevante para definir a tecnologia a ser adotada nos painéis solares.

Existem equipamentos, espectrômetros, capazes de realizar medições para estimar o espectro de determinadas faixas do espectro de radiação eletromagnética. Estes, são projetados para medir a intensidade da radiação em faixas definidas. Alguns modelos são projetados para medir na faixa do ultravioleta ao infravermelho, mesma faixa da radiação solar incidente. É comum tais espectrômetros dividir a faixa do espectro em mais de 2048 medições, por exemplo, o SOLAR-RAD Solar SpectroRadiometer Systems (2048 medições), BLUE-Wave-UVN (3000 medições) e o StellarNet GREEN-Wave miniature spectrometers (2048 medições). Contudo, o preço do equipamento tem relação com a quantidade de medições realizadas no espectro. Por exemplo, dos espectrômetros citados, o de menor custo, custa US \$1.948,00, podendo chegar a US\$ 13.125,00, de acordo com pesquisa realizada em dezembro de 2020 nos sites da StellarNet, Inc. uma fornecedora global de espectrômetros.

Atualmente o IFPE Campus Pesqueira possui uma usina solar e, recentemente, obteve a aprovação do Ministério da Educação, dentro do Programa para Desenvolvimento em Energias Renováveis e Eficiência Energética (EnergiF), tornando-se um centro de referência em energia solar, na rede federal de educação profissional, científica e tecnológica. Contudo, considerando o cenário econômico nacional atual, não há previsão orçamentária para a aquisição deste equipamento. O desenvolvimento de um espectrômetro de baixo custo no IFPE pode representar ganho de eficiência nas futuras usinas do IFPE, e, abre novas possibilidades para pesquisas, publicações científicas, registro de propriedade intelectual, incubação de projetos e prestação de serviços tecnológicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

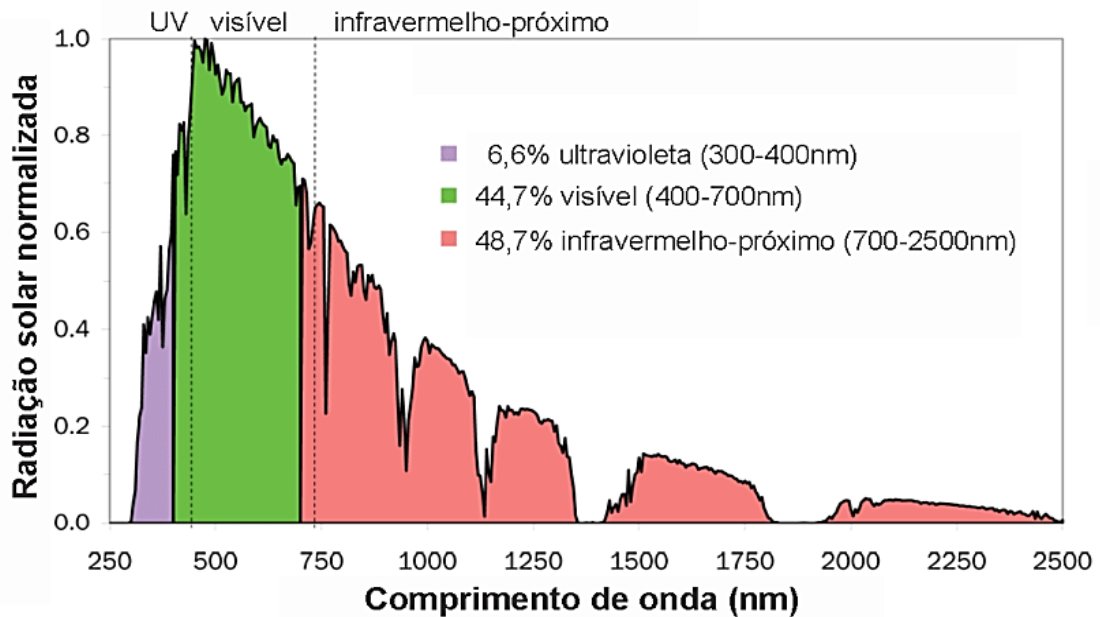
Para realizar a pesquisa, é necessário entender como se comporta o espectro solar dentro e fora da nossa atmosfera e entender o que pode alterar as características do espectro solar em cada região. Então o primeiro passo foi o estudo da radiação solar que chega na superfície terrestre.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

Segundo Souza e Schuch (2001) a radiação solar é uma forma de radiação eletromagnética, que, se disposta de acordo com seus comprimentos de onda, forma um arranjo contínuo. Boa parte dessa radiação eletromagnética emitida pelo sol está localizada no intervalo de $0,15 \mu\text{m}$ e $4,00 \mu\text{m}$, esse intervalo é chamado de domínio da radiação solar (Gonzales e Silva, 1998).

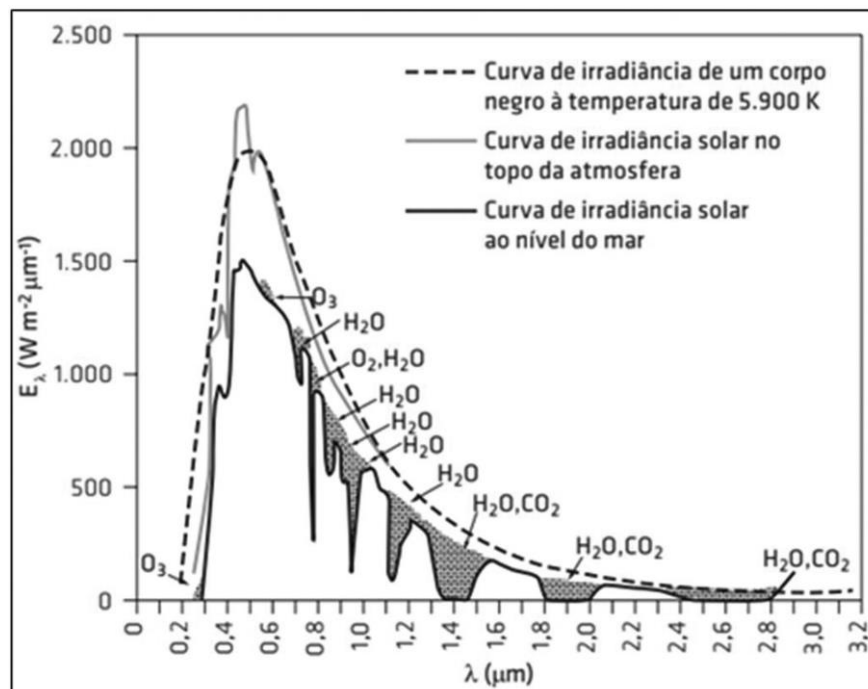
Se comparamos o espectro de radiação solar, com o espectro de radiação eletromagnética, veremos que a radiação emitida pelo sol está localizada nas regiões do espectro que chamamos respectivamente de ultravioleta, visível e infravermelho-próximo. Podemos ver na Fig. 1 como é dada essa distribuição de acordo com o comprimento de onda e as regiões no espectro. Como mostra a Fig. 2, a curva da radiação solar se comporta similarmente como a curva da radiação de um corpo negro emitindo a aproximadamente 6000 K, o que está de acordo com a lei de Planck para a emissão de radiação. (Souza e Schunch, 2001).

Figura 1 – Espectro da radiação solar



Fonte: Souza, Rui & Reboita, Michelle & Werle, Ana & Costa, Eliane.

Figura 2 – Comparação da curva de irradiância solar no topo da atmosfera, da irradiância solar padrão ao nível do mar, e da curva de irradiância de um corpo negro a 5.900K e identificação de regiões espectrais que ocorrem absorção molecular



Fonte: CARLESSO (2019)

Segundo Souza e Schunch (2001) a radiação solar incidente sobre uma superfície horizontal é denominada “radiação global”, e ela possui dois tipos de componentes: a componente direta e a componente difusa. A componente direta corresponde aos

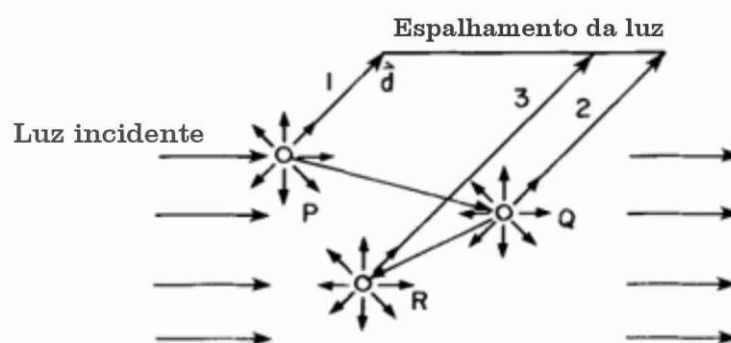
fótons provenientes diretamente do feixe solar, já a componente difusa é constituída pelos fótons que sofreram espalhamentos múltiplos na atmosfera e depois foram redirecionados para a superfície terrestre.

A componente difusa acontece, pois, a atmosfera terrestre é composta por moléculas e átomos, que absorvem e espalham determinadas faixas do espectro solar. Logo o espectro de emissão solar é distinto no topo da atmosfera terrestre e em sua superfície, como mostra a Fig. 2. Podemos notar que ao passar pela atmosfera o espectro solar é absorvido por alguns gases, como o O_3 , H_2O , O_2 e CO_2 . Por esse motivo é importante entendermos quais tipos de materiais compõem nossa atmosfera e como é dado esse processo de absorção e espalhamento.

2.2 ESPALHAMENTO E ABSORÇÃO

Segundo Liou (1980) o espalhamento é um processo físico o qual uma determinada partícula no caminho de uma onda eletromagnética extrai energia da onda incidente e espalha essa energia em todas as direções. Podemos observar a Fig. 3 para entendermos melhor o processo de espalhamento.

Figura 3 – Processo de espalhamento múltiplo da luz



Fonte: Adaptado de Liou (1980)

Note que uma vez que a luz incidente é espalhada por uma partícula em todas as direções, a mesma luz espalhada pela partícula pode ser absorvida por uma outra partícula e novamente ser redirecionada para todas as direções. Chamamos esse processo de espalhamento múltiplo. (Liou, 1980).

O espalhamento pode acontecer de maneiras diferentes, pois a maneira como a partícula espalha a luz está relacionado com o tamanho da partícula em relação ao comprimento de onda incidente. Esse processo de espalhamento pode acontecer com partículas muito pequenas, como as moléculas de gases ($\sim 10^{-8} \text{ cm}$) ou até em grandes gotas de chuva e partículas de granizo ($\sim 1 \text{ cm}$). (Liou, 1980)

Quanto maior a partícula, mais a energia espalhada é concentrada para frente. Ou seja, os padrões de espalhamento são alterados de acordo com o tamanho da partícula. Quando a partícula que espalha a luz é muito menor que o comprimento de onda incidente, o espalhamento é chamado de espalhamento de Rayleigh, já para partículas maiores ou semelhantes ao comprimento de onda da luz incidente, nós nos referimos a esse espalhamento como espalhamento de Mie. (Liou, 1980)

O espalhamento de Rayleigh ou espalhamento molecular é um dos mais importantes para nosso estudo, pois, esse tipo de espalhamento é produzido essencialmente pelas moléculas dos gases que compõem a atmosfera terrestre. A Equação (1) nos mostra que a intensidade do espalhamento é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda. (Latorre et al, 2002)

$$K_{r\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (1)$$

Isso significa que quanto menor o comprimento de onda, maior será a intensidade do espalhamento. Segundo Latorre et al (2002), esse efeito pode ser considerado desprezível com comprimentos de onda acima de $1\mu\text{m}$. Um dia ensolarado com “céu azul” é uma manifestação direta do espalhamento de Rayleigh. A luz do sol interage com os gases da atmosfera e o espalhamento acontece, como o espalhamento ocorre com mais intensidade nos menores comprimentos de onda esse efeito torna o céu azul (Latorre et al, 2002).

Se formos analisar em um contexto geral, a maior parte da luz que chega aos nossos olhos são resultados do processo de espalhamento, e o espalhamento costuma ser acompanhado da absorção (Liou, 1980). Com esses dois processos, espalhamento e absorção, a radiação solar perde energia quando passa por nossa atmosfera. Então, precisamos saber quais gases e moléculas constituem nossa atmosfera e quais faixas do espectro eletromagnético são mais absorvidas por esses gases e moléculas.

2.3 ATMOSFERA

A atmosfera é composta por uma série de gases, que podem ser divididos em dois grupos: os gases permanentes e os gases de concentração variável. Por exemplo o nitrogênio (N), oxigênio (O_2), argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO_2) são gases permanentes na atmosfera, já o vapor d'água (H_2O), ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2) são constituintes de concentração variável. O ozônio (O_3), por exemplo, varia muito em altitudes que ficam a cerca de 15 a 30 km, onde ele pode ser produzido ou destruído por reações fotoquímicas (Liou, 1980).

Embora o nitrogênio (N), oxigênio (O_2) e o argônio (Ar) constituam 99% dos gases da atmosfera, como mostra a Tabela 1, o vapor d'água (H_2O) tem um papel importante no estudo da absorção e emissão de radiação por gases na atmosfera, como será detalhado adiante. Todos os gases listados na Tabela 1 são responsáveis pelo espalhamento da radiação solar. (Liou, 1980).

Tabela 1 – Gases que compõem a atmosfera.

CONSTITUINTES	PORCENTAGEM %
NITROGÊNIO(N_2)	78,084
OXIGÊNIO(O_2)	20,948
ARGÔNIO(Ar)	0,934
DIÓXIDO DE CARBONO(CO_2)	0,033
NEÔNIO(Ne)	$18,18 \times 10^{-4}$
HÉLIO(He)	$5,24 \times 10^{-4}$
KRIPTÔNIO(Kr)	$1,14 \times 10^{-4}$
XENÔNIO(Xe)	$0,089 \times 10^{-4}$
HIDROGÊNIO(H_2)	$0,5 \times 10^{-4}$
METANO (CH_4)	$1,5 \times 10^{-4}$
ÓXIDO NITROSO (N_2O)	$0,27 \times 10^{-4}$
MONÓXIDO DE CARBONO(CO)	$0,19 \times 10^{-4}$
VAPOR D'ÁGUA (H_2O)	0 - 0,04
OZÔNIO(O_3)	$0 - 12 \times 10^{-4}$
DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO_2)	$0,001 \times 10^{-4}$
DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO_2)	$0,001 \times 10^{-4}$
AMÔNIA (NH_3)	$0,004 \times 10^{-4}$
ÓXIDO NÍTRICO (NO)	$0,0005 \times 10^{-4}$
SULFETO DE HIDROGÊNIO (H_2S)	$0,00005 \times 10^{-4}$

Fonte: adaptação de Liou (1980)

2.4 ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO POR PARTE DOS GASES NA ATMOSFERA

Antes de falarmos sobre a absorção de radiação por parte dos gases que compõem nossa atmosfera, vamos discutir sobre como esses gases ou moléculas podem armazenar energia. Segundo Liou (1980), os gases podem armazenar energia na forma translacional, rotacional e vibracional. Esses três estados de energia são quantizados e assumem apenas valores discretos.

A energia armazenada no estado translacional ocorre quando a partícula possui energia cinética, a energia translacional média de uma molécula é igual a $KT/2$ onde K é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta. Já o armazenamento de energia no estado rotacional acontece quando átomos giram em torno de um eixo através de seu centro de gravidade. E por fim, a energia no estado vibracional ocorre quando os átomos vibram em torno de suas posições de equilíbrio. Porém, é possível que a energia da molécula mude devido a uma mudança no estado de energia dos elétrons em sua composição, desse modo a molécula possui energia eletrônica. É importante falar nesses estados de energia, uma vez que a absorção e a emissão de

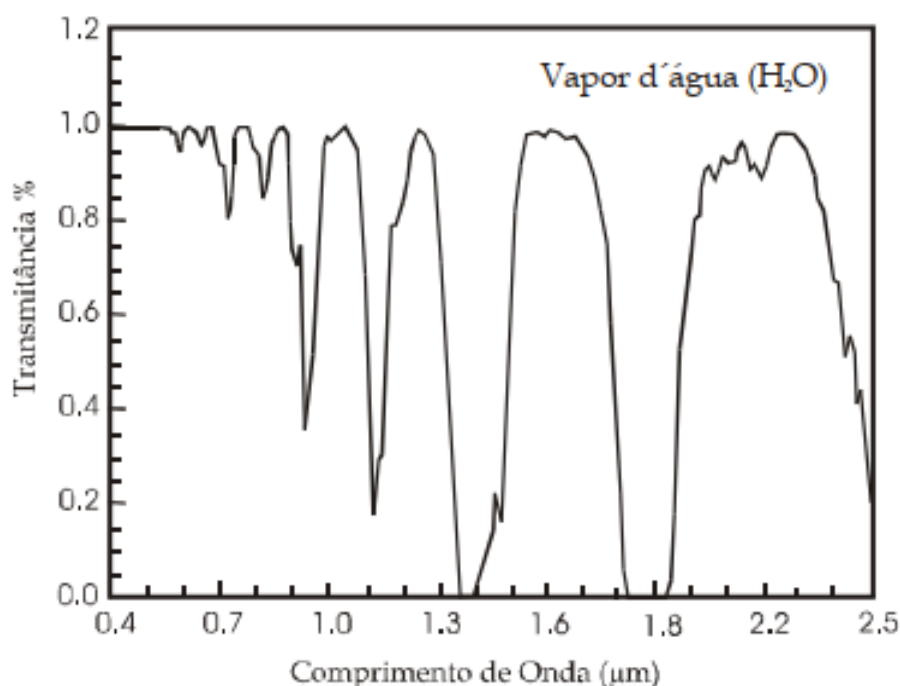
radiação ocorrem justamente quando átomos ou moléculas mudam de um estado de energia para o outro (Liou, 1980).

O espectro de absorção de cada gás muda de acordo com o tipo de transição de cada elemento. O espectro de absorção do oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e do ozônio (O_3) ocorre devido a transições eletrônicas, localizadas principalmente na região ultravioleta (UV). Já os gases triatômicos, como o vapor d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2) ocorrem principalmente devido às transições vibracionais e rotacionais das moléculas, e, tendem a absorver mais radiação no infravermelho (Liou, 1980).

Dos mais de 30 gases que estão presentes na nossa atmosfera, apenas 7 gases, apresentam efeito de absorção observável numa faixa de 400 nm a 2500 nm, a qual é a região que concentra 99% da radiação solar. São eles: o vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e oxigênio (O_2). (Gao et al.,1993)

Se analisarmos a Fig. 4, podemos observar que o vapor d'água possui uma extensa faixa de absorção, apresentando seus picos de absorção em 940 nm, 1140 nm, 1380 nm e 1880 nm. (Latorre et al, 2002)

Figura 4 – Curvas do espectro de transmitância do Vapor D'água considera-se que o observador está acima da atmosfera, perpendicular à superfície e com ângulo Zenital de 45°



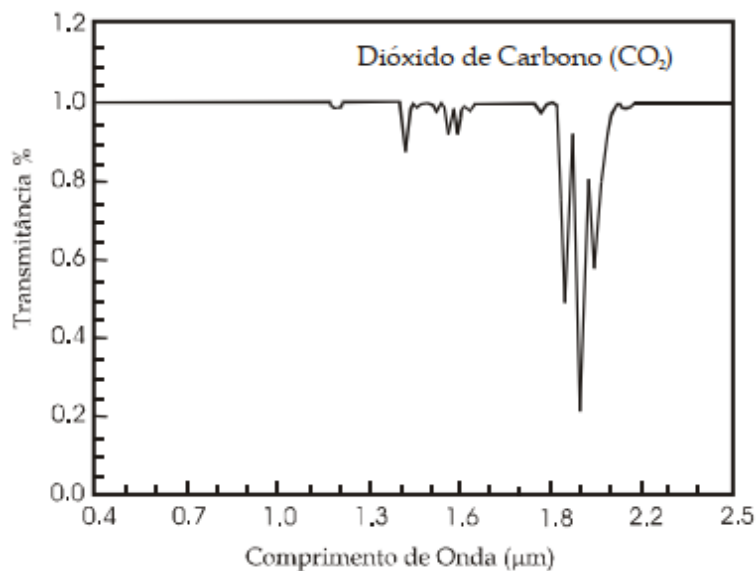
Fonte: (Latorre et al, 2002 apud Gao et al.,1993)

A concentração vertical de gases na atmosfera é variável. O vapor d'água, por exemplo, diminui sua concentração rapidamente com a altitude, e, segundo Gao et al. (1993), esse é um dos motivos da concentração do vapor d'água ser alterada de maneira tão drástica dependendo do local e momento em que é medida.

Na Fig. 5 e Fig. 6 podemos observar o espectro de absorção dos demais gases citados anteriormente, os quais apresentam efeito de absorção observável na faixa do espectro de radiação solar. Se compararmos o espectro de absorção do vapor

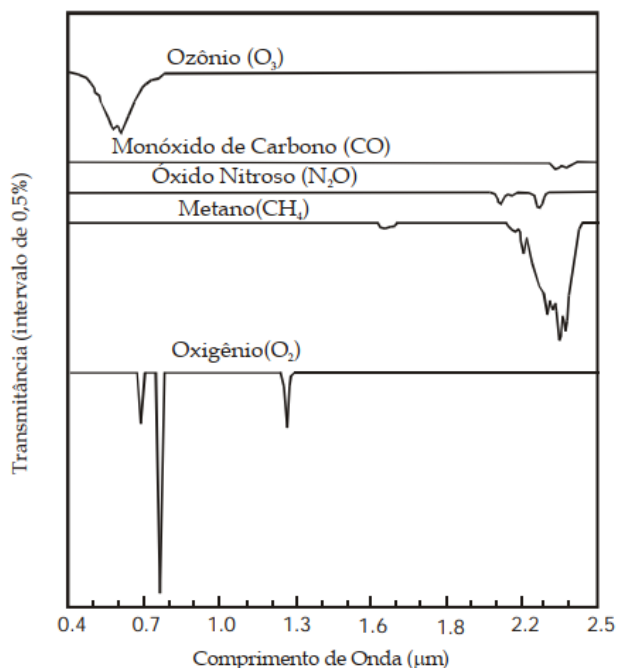
d'água ao espectro de absorção dos demais gases, é perceptível que o vapor d'água absorve mais radiação em faixas distintas do espectro do que os demais gases.

Figura 5 – Curvas do espectro de transmitância do dióxido de carbono considera-se que o observador está acima da atmosfera, perpendicular à superfície e com ângulo Zenital de 45°



Fonte: (Latorre et al, 2002 apud Gao et al.,1993)

Figura 6 – Curvas do espectro de transmitância dos gases Ozônio, Monóxido de Carbono, Óxido Nitroso, Metano e Oxigênio considera-se que o observador está acima da atmosfera, perpendicular à superfície e com âng Zenital de 45°.



Fonte: (Latorre et al, 2002 apud Gao et al.,1993)

Considerando os espectros de absorção apresentados, e a possibilidade de variação na concentração dos gases na atmosfera, há variação do espectro da

radiação solar incidente na superfície terrestre. Tal espectro da radiação solar combinado à resposta espectral dos módulos fotovoltaicos é relevante para a definição da tecnologia de módulos fotovoltaicos que será utilizada em usinas solares visando a melhor eficiência.

2.5 SENSIBILIDADE ESPECTRAL

A resposta espectral de uma célula fotovoltaica é a sensibilidade de absorver radiação em diferentes comprimentos de onda. A resposta espectral de uma célula depende do tipo de semicondutor que é usado em sua construção. Segundo Huang et al (2020), um material semicondutor só pode utilizar e converter fótons com níveis de energia maiores que a *bandgap* do material. *Bandgap* é uma faixa entre as bandas de energia de valência e condução de um determinado semicondutor, que não pode ser ocupado por elétrons, e que determina a energia necessária para que um elétron salte entre as bandas. (Fudong, 2019)

Abaixo nós podemos ver os *bandgaps* de alguns materiais semicondutores a uma temperatura de 300K.

Tabela 2 – *bandgaps* de alguns materiais semicondutores.

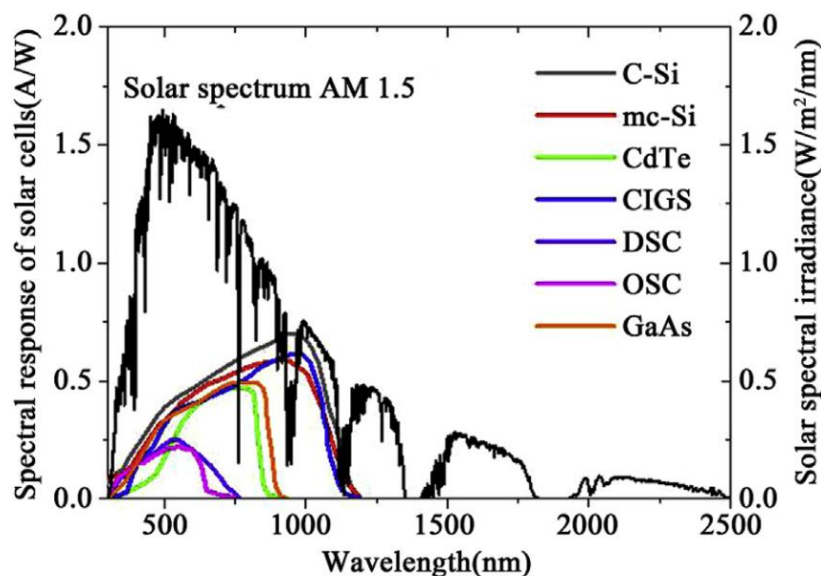
Material	Bandgap (eV)	Comprimento de onda (nm)
Ge	0.66	1878
GaSb	0.68	1823
Si	1.11	1115
GaAs	1.43	867
CdTe	1.44	860
CdSe	1.74	712
GaP	2.25	551
ZnO	3.2	387

Fonte: adaptação de Huang et al (2020)

Essa energia de *bandgap* é importante pois, se analisarmos a energia de *bandgap* do CdTe, que é de 1,44 eV, e essa energia corresponde a um comprimento de onda de 860 nm, podemos afirmar que esse tipo de material não é capaz de converter radiação em energia fotovoltaica para comprimentos maiores que 860 nm. Na Fig. 7 podemos ver a comparação do espectro de irradiância solar padrão AM1.5, que segundo Huang Et al. (2020) é muito usado para simulações de desempenho de sistemas de energia solar fotovoltaica, e a resposta espectral de alguns tipos de semicondutores utilizados na construção de células fotovoltaicas.

Se analisarmos a Fig. 7 podemos ver que para os comprimentos de ondas maiores que 860 nm, o CdTe não converte essa radiação em energia fotovoltaica. Isso não significa que a radiação solar com comprimentos de onda menores que 860nm será convertida em energia. De acordo com o gráfico, podemos notar que a faixa de absorção do CdTe está localizada entre 450 nm e 860 nm, isso significa que as células fotovoltaicas feitas desse tipo de material só conseguem ter uma eficiência energética viável nessa faixa de comprimento de onda. (Huang et al, 2020).

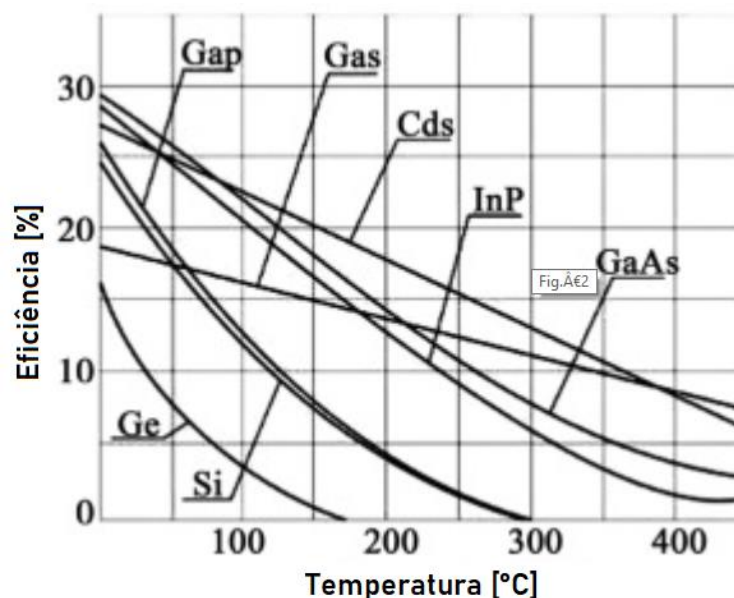
Figura 7 – Espectro solar padrão AM1.5 e resposta espectral de diferentes células fotovoltaicas.



Fonte: Huang et al (2020)

Segundo Huang et al (2020) para comprimentos de ondas maiores que a energia de *bandgap*, os fótons contribuem para o aumento da energia interna da célula, e com isso a célula aumenta sua temperatura e, conseqüentemente, a eficiência energética da célula é reduzida, conforme pode ser observado na Fig. 8.

Figura 8 – Eficiência elétrica de diferentes células fotovoltaicas em função da temperatura.



Fonte: adaptação de Huang et al (2020)

3 METODOLOGIA

A combinação do espectro da radiação solar incidente e a tecnologia do painel solar impacta na eficiência global do sistema de conversão de energia solar em elétrica. Portanto, conhecer o espectro solar da região é relevante para definir a tecnologia a ser adotada nos painéis solares.

Adicionalmente, estudamos as tecnologias mais utilizadas no mercado visando definir a que apresenta melhor viabilidade técnica e econômica levando em consideração o espectro de irradiação solar, e suas variações de acordo com a composição atmosférica.

3.1 ESTIMAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR

Uma vez que o espectro de radiação solar extraterrestre, bem como as faixas de absorção dos gases na atmosfera, são conhecidos, podemos estimar o espectro de radiação solar na atmosfera. Há duas vantagens em utilizar a técnica proposta neste trabalho: (i) o equipamento não precisa ser extremamente preciso quanto a identificação dos comprimentos de onda da radiação. Como acontece em modelos comerciais, que utilizam sensores CCD de alta performance e a baixas temperaturas, usando resfriadores termoelétricos integrados (TEC) para diminuir a temperatura e consequentemente diminuir o ruído causado na medição, tendo uma precisão maior mesmo em medições de baixas intensidade. Um exemplo disso é o modelo DWARF-Star da StellarNet, que mantém seus sensores a uma temperatura de aproximadamente -10°C . No protótipo proposto, iremos comparar os dados obtidos com outro espectrômetro disponível no mercado, a fim de identificar inconformidades e, aperfeiçoar o algoritmo desenvolvido para a estimação do espectro de radiação solar. (ii) o equipamento não necessita realizar 2048 ou mais medições de intensidade da radiação para estimar o espectro solar. Essas duas vantagens refletem na redução do custo para desenvolvimento e montagem do espectrômetro solar em comparação com os comerciais.

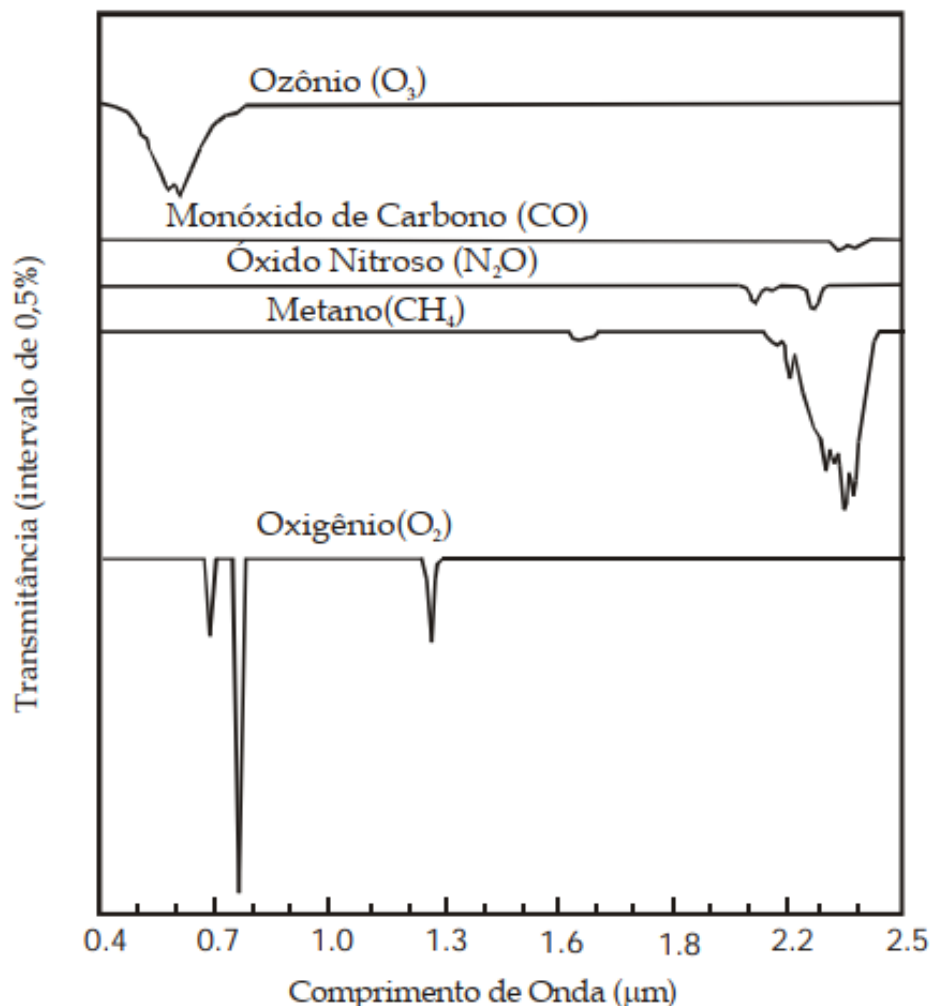
A segunda vantagem descrita anteriormente está em não ser necessário realizar 2048 ou mais medições de intensidades relativas a comprimentos de ondas do espectro solar, como é feito geralmente nos espectrômetros comerciais, tais como no GREEN-Wave e BLUE-Wave. O espectrômetro BLUE-Wave da StellarNet, por exemplo, pode realizar cerca de 3648 medições.

Neste projeto, iremos identificar a amplitude de picos e vales da radiação solar absorvida por gases na atmosfera e com essa informação em mãos, e também conhecendo o espectro de referência da radiação solar extraterrestre, iremos estimar o espectro de radiação solar na superfície.

Como podemos observar na Fig. 6, o oxigênio tem faixas de absorção próximas a $0,7\ \mu\text{m}$, $0,8\ \mu\text{m}$ e $1,3\ \mu\text{m}$. A proporção entre os vales de absorção desse gás é constante, o que vai variar é a intensidade desses vales. Quanto maior for a concentração desse gás em uma determinada região, maior será a profundidade desse vale, entretanto a relação entre os vales (próximos a $0,7\ \mu\text{m}$, $0,8\ \mu\text{m}$ e $1,3\ \mu\text{m}$) continua a mesma, se um aumenta, consequentemente o outro aumenta na mesma proporção, pois a concentração de gás naquela região é a mesma. Em outras palavras, conhecendo a intensidade de um vale de um determinado gás, é possível estimar os demais vales e intensidade desse gás.

Logo, podemos escolher faixas estratégicas de radiação para cada gás e, a partir da medição da intensidade da radiação nestas faixas, podemos estimar as curvas de absorção para cada gás.

Figura 6 – Espectro de transmitância do Ozônio, Monóxido de Carbono, Óxido Nitroso, Metano e Oxigênio.



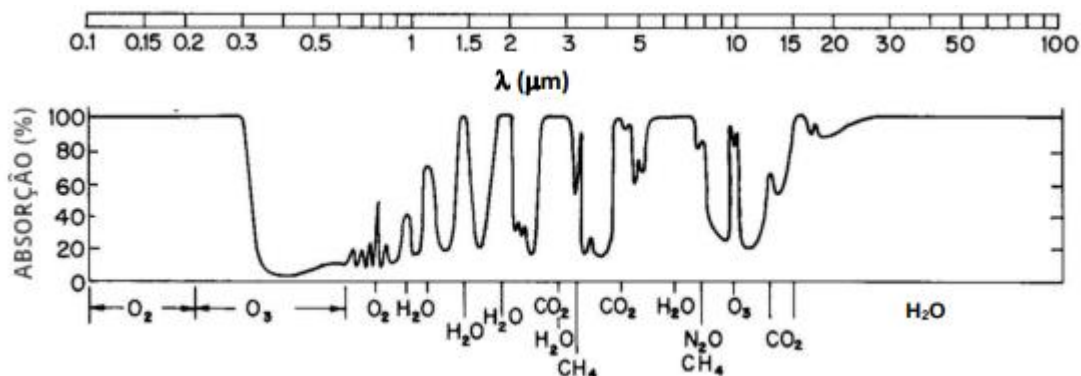
Fonte: (Latorre et al, 2002 apud Gao et al.,1993)

Ao combinar as curvas estimadas de absorção e o espectro da radiação solar extraterrestre, podemos estimar o espectro de radiação solar incidente na superfície.

Como já dito anteriormente, dos mais de 30 gases que estão presentes na nossa atmosfera, apenas 7 gases, apresentam efeito de absorção observável. Na Fig. 9, podemos observar graficamente as curvas de absorção em função do comprimento de onda de cada um dos 7 gases. Observamos também que na faixa da luz visível que compreende o intervalo que vai de 0,3 a 0,8 μm , boa parte radiação não é absorvida, como previsto por vários autores ao longo do trabalho.

Se analisarmos os picos de absorção desses 7 gases, na faixa que vai de 0,4 a 2,5 μm , a qual, concentra 99% da radiação solar, e organiza-los em uma tabela, veremos que os picos e os vales das curvas de absorção serão o que está descrito na Fig. 10.

Figura 9 – Percentual de absorção atmosférica de radiação para comprimentos de onda entre 0,1 a 100 μm



Fonte: Adaptado de (AMORIM, Bruna, 2015)

Figura 10 – Características de absorção dos Gases em uma faixa que fica entre 0,4 – 2,5 mm

GASES	Características de Absorção da energia
H ₂ O _v	<ul style="list-style-type: none"> • É a mais forte fonte de absorção da energia radiante, possuindo maior importância entre os gases. • Apresenta pico de absorção em várias bandas, onde os maiores estão centrados em 0,94μm, 1,14μm, 1,38μm e 1,88 μm.
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Possui fortes bandas próximas de 2μ (1,96μm, 2,01μm, 2,08μm).
O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Possui uma banda próxima de 0,6μm.
N ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • possui fracas bandas entre 2μm e 2,5 μm
CO	<ul style="list-style-type: none"> • possui fracas bandas entre 2μm e 2,5 μm
CH ₄	<ul style="list-style-type: none"> • possui uma banda próximo de 2,35μm
O ₂	<ul style="list-style-type: none"> • várias bandas entre 0,6 μm e 1,3 μm.

Fonte: Adaptado de (Latorre et al, 2002)

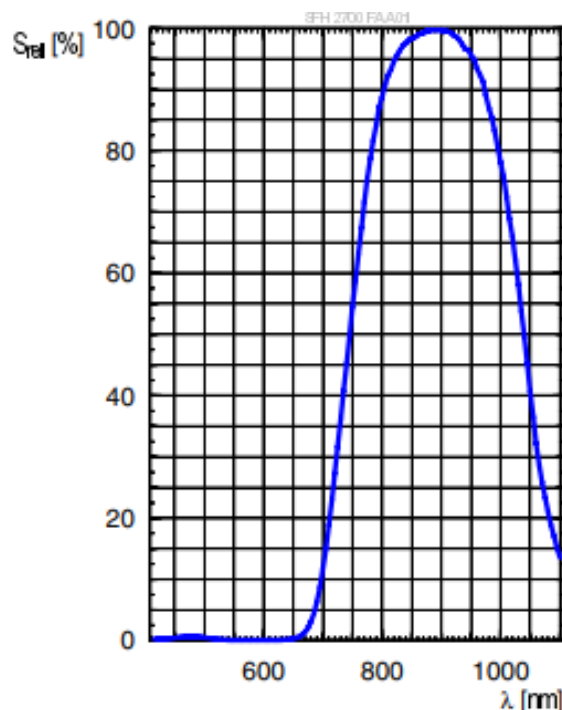
3.1.1 ABORDAGENS UTILIZADAS

Visando medir a intensidade da radiação solar em comprimentos de onda selecionados, foram projetadas e estudadas três abordagens. A primeira consiste em usar um conjunto de fotodiodos com diferentes respostas espectrais. A segunda, utiliza filtros ópticos passa-faixa. Por fim, a terceira técnica visa utilizar dois fotodiodos móveis em conjunto com um prisma.

Inicialmente a ideia para a construção do protótipo foi usar fotodiodos com a sensibilidade espectral relativa em comprimentos de ondas que fossem relevantes e que será detalhado um pouco adiante. Porém, após o levantamento de 428 modelos, tais como os fotodiodos WP7113PD1BT/BD-P22, SFH 2700 FA A01 e o SFH 2713, foi constatado que a sensibilidade espectral desses componentes é muito larga, de modo que não iríamos conseguir isolar os vales que eram relevantes para o protótipo.

Por exemplo, na Figura 11 é possível observar a resposta do fotodiodo modelo SFH 2700 FA A01. Podemos observar que a sensibilidade espectral relativa deste modelo é relevante entre 700 e 1100 nm, tendo seu pico em aproximadamente 900 nm. Sendo assim, a faixa da sensibilidade espectral relativa é muito larga para nosso propósito. Visando isolar os vales do espectro da radiação, precisávamos de fotodiodos que tivessem uma faixa de sensibilidade espectral de aproximadamente 10 nm e dentre os fotodiodos observados, a menor faixa foi de 300 nm. Adicionalmente, nenhum modelo pesquisado possuía o pico da sensibilidade no comprimento de onda desejado, ou seja, no centro dos vales e picos selecionados.

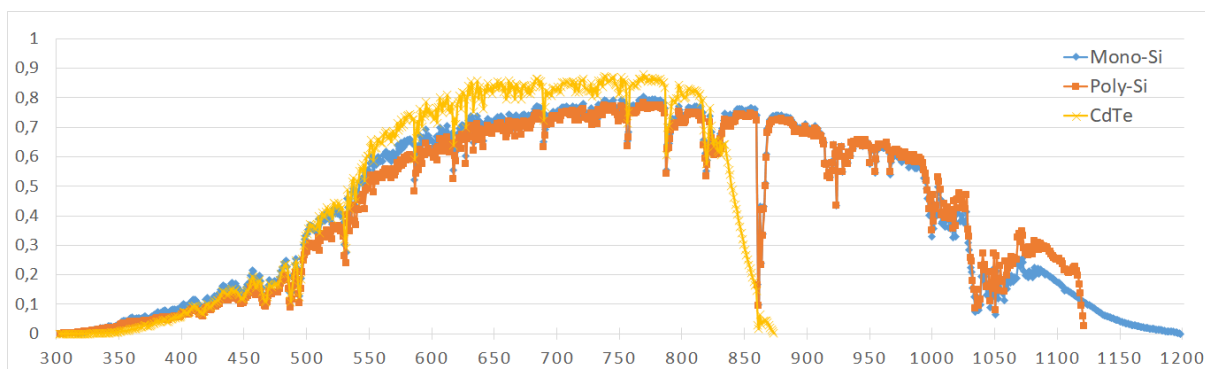
Figura 11 – Sensibilidade espectral relativa em função do comprimento de onda do fotodiodo modelo SFH 2700 FA A01.



Fonte: CHIPLLED (2020)

Os comprimentos de onda relevantes foram selecionados a partir do cruzamento dos dados de resposta espectral das células fotovoltaicas e do espectro da radiação solar incidente. Quanto maior for o valor obtido a partir da multiplicação destas duas informações, para um determinado comprimento de onda, mais energia solar será convertida em elétrica. Um gráfico foi obtido a partir dessa multiplicação e pode ser visto na Fig. 12.

Figura 12 – Gráficos resultantes da multiplicação da sensibilidade espectral e da radiação solar a nível do mar para três tecnologias de células fotovoltaicas.



Fonte: Própria (2020)

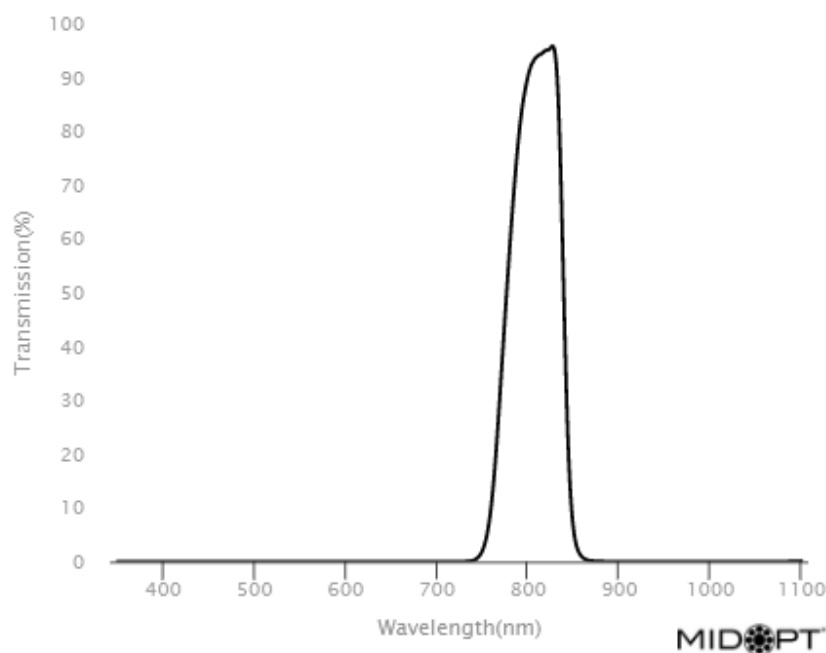
A partir da Fig. 12 é possível observar que é na faixa entre 600 e 800 nm que há mais eficiência em termos de espectro da radiação. Logo, medições nesta faixa são desejáveis. Observamos que, a partir de 850 nm, a tecnologia CdTe não gera energia de forma significativa. Por fim, há vales estreitos nas curvas apresentadas que representam picos de absorção da atmosfera. Logo, se for desejado medir a diferença de eficiência entre as tecnologias, para um determinado comprimento de onda (com largura estreita), a resposta dos sensores ópticos deve ser estreita o suficiente para que seja capaz de medir a intensidade da radiação neste comprimento de onda sem ter a interferência de um vale próximo. Ou o contrário, medir a profundidade do vale sem ter a interferência dos pontos adjacentes.

Visto a inviabilidade técnica do primeiro método, o próximo passo foi pesquisar por filtros ópticos, visando reduzir a largura da resposta espectral do conjunto filtro + fotodiodo. Porém, após o levantamento de 74 modelos, tais como os filtros ópticos passa-faixa BP324, BP810 e Bi650, foi constatado que a sensibilidade espectral, mesmo com os filtros em conjunto com os fotodiodos, permaneceu larga, de modo a ainda não conseguirmos isolar os vales que eram necessários para a pesquisa.

Na Fig. 13 é possível observar a resposta do filtro BP810, que tem uma faixa de absorção de 65 nm, localizada no infravermelho próximo. Mesmo sendo mais estreita que a resposta dos fotodiodos, ainda tem largura superior a necessária para identificar os vales no espectro solar.

Por fim, propomos neste TCC um sistema baseado em prisma para espalhamento da luz, assim como realizado em espectrômetros comerciais, porém, com diferente sensor óptico. Ao invés de usar um sensor CCD linear de 1024, 2048 ou mais medições, foi optado utilizar dois fotodiodos, sendo deslocado mecanicamente e varrendo toda a luz que foi espalhada pelo prisma. O projeto está detalhado na seção de resultados.

Figura 13 – Sensibilidade do filtro passa-faixa BP810 em função do comprimento de onda.



Fonte: BP810 Near-IR Bandpass Filter, 2020.

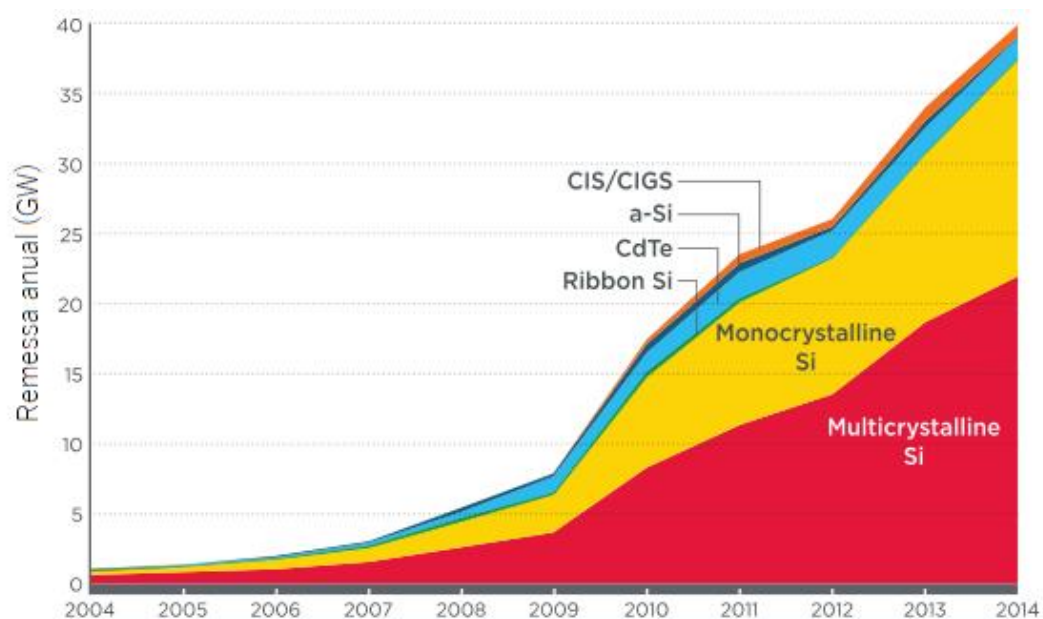
3.2 ANÁLISE DE TÉCNOLOGIAS DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

Levando em consideração os fatores relacionados à sensibilidade espectral que influenciam na eficiência dos módulos e a mudança do espectro de irradiação solar em determinadas regiões devido a composição atmosférica. Precisamos estudar quais são as tecnologias disponíveis no mercado na fabricação de módulos fotovoltaicos.

Segundo o Escritório de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE, 2019) cerca de 95% dos módulos fabricados no mundo usam o silício monocristalino ou policristalino. Se analisarmos a Fig. 14, o silício monocristalino e policristalino ocupam a maior parte do mercado, seguidos do telureto de cádmio (CdTe), que seria a terceira tecnologia mais utilizada na fabricação de módulos. O estudo sobre o mercado da fabricação fez-se necessário para limitar o número de tecnologias a serem estudadas uma vez que as tecnologias mais utilizadas são as mais viáveis econômica e tecnicamente.

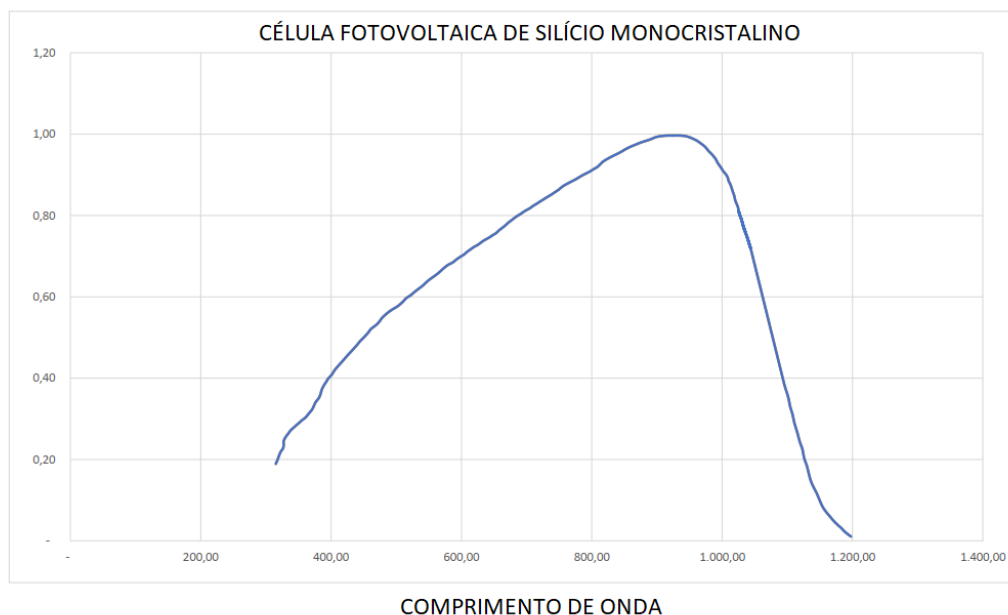
Fizemos então o estudo da resposta espectral de alguns fabricantes de células fotovoltaicas no mercado. Esse tipo de dados são encontrados geralmente no datasheet da célula. Nas Fig. 15, 16 e 17, podemos ver o gráfico da resposta espectral do silício monocristalino, policristalino e do telureto de cádmio. Os gráficos mostram a resposta espectral da célula em função do seu comprimento de onda. Tivemos que refazer esses gráficos para usá-los no próximo passo da pesquisa, que será explicado mais à frente. A metodologia para extração dos dados de gráficos contidos em documentos PDF ou imagens da internet está descrita no final desta seção.

Figura 14 – Remessas anuais de diferentes tecnologias fotovoltaicas em função do tempo.



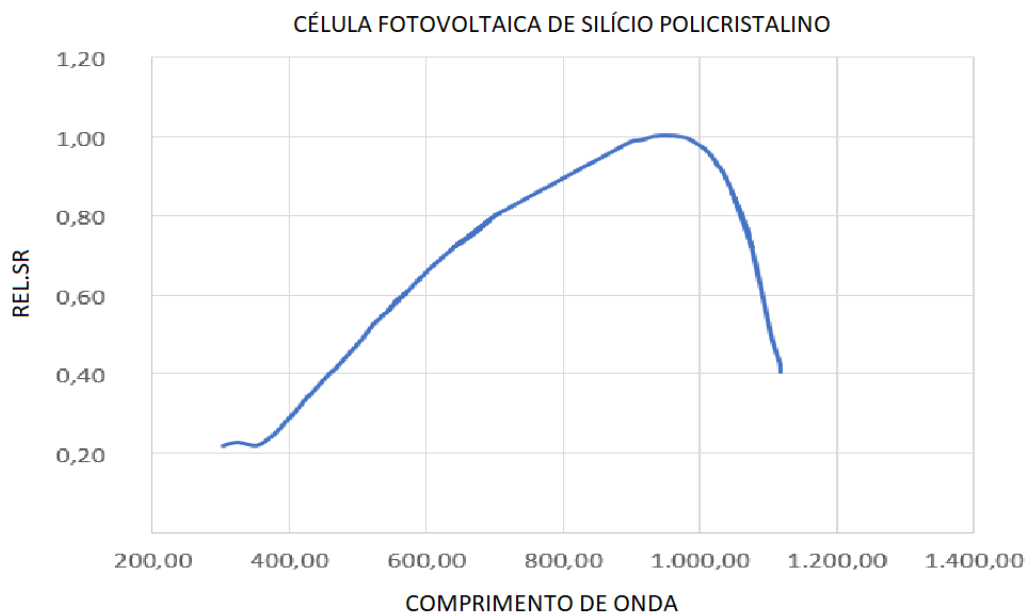
Fonte: adaptação de Woodhouse, Michael et al (2019)

Figura 15 – Resposta espectral da célula fotovoltaica de silício monocristalino.



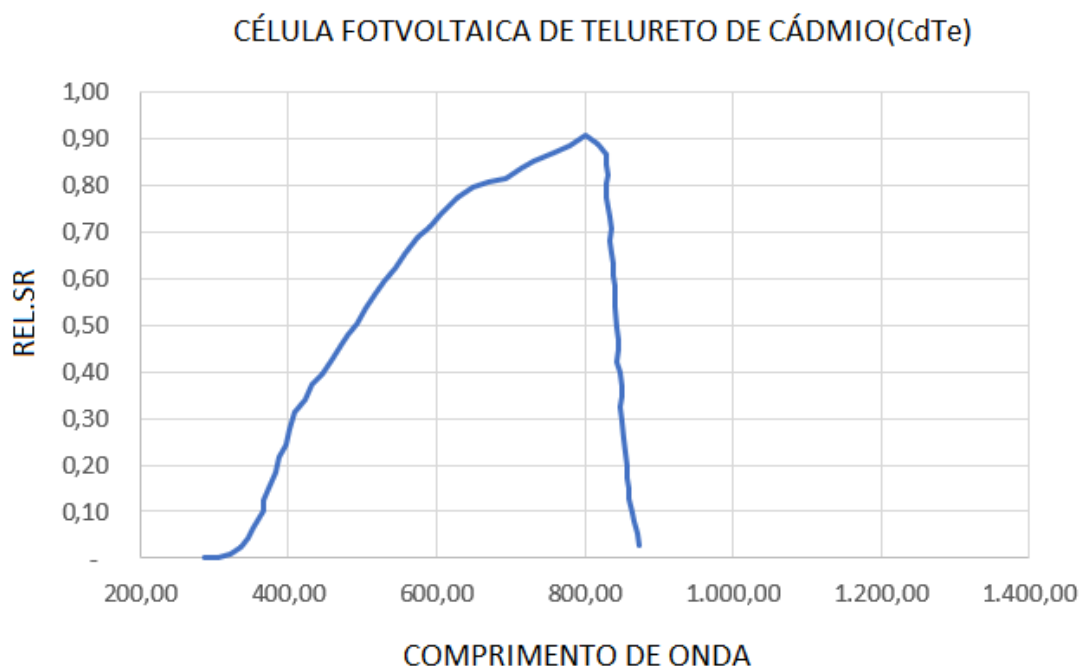
Fonte: adaptação de QCELLS (2013)

Figura 16 – Resposta espectral da célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: DeISolar (2003)

Figura 17 – Resposta espectral da célula fotovoltaica de telureto de cádmio.



Fonte: adaptação de ABELLA (2014)

Para reduzir o custo do protótipo, tivemos que estudar quais faixas de radiação solar são mais influentes para esses determinados tipos de células, mostradas acima, para assim escolhermos qual fotodiodo iremos usar, mas primeiro, precisávamos de um modelo espectral da radiação solar, que nos permitisse simular como eram essas curvas de irradiação. Esse tipo de dados é obtido por tabelas ou programas

computacionais, assim poderíamos modelar a radiação solar que chega na nossa atmosfera em faixas espectrais bem definidas.

Então usamos como espectro de referência o ASTM G173-03. A ASTM G173-03 disponibiliza uma tabela que contém distribuições de irradiância espectral solar terrestre, que serve como uma referência padrão para irradiância solar hemisférica (ASTM G173-03, 2003). Nessa tabela podemos gerar o gráfico da irradiância solar em função do comprimento de onda que varia de 400 a 1700 nm, levando em conta condições atmosféricas consideradas favoráveis para a produção de energia solar fotovoltaica (ASTM G173-03, 2003).

Os dados obtidos nessa faixa de 400 a 1700 nm através do espectro de referência ASTM G173-03 já seriam suficientes pois iremos multiplicar os gráficos dos respectivos semicondutores com o gráfico da radiação espectral para saber quais faixas de radiação seriam melhor absorvidas por cada um dos semicondutores.

Isso foi feito com o intuito de reduzir o custo do protótipo porque ao invés de comprarmos vários fotodiodos que abrangem todo o espectro de radiação solar, nós só precisávamos adquirir os fotodiodos que tivessem uma faixa de absorção igual ou próxima às das faixas de radiação mais influentes nas diferentes tecnologias escolhidas.

3.3 EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÕES A PARTIR DE DOCUMENTOS PDF OU IMAGENS JPG

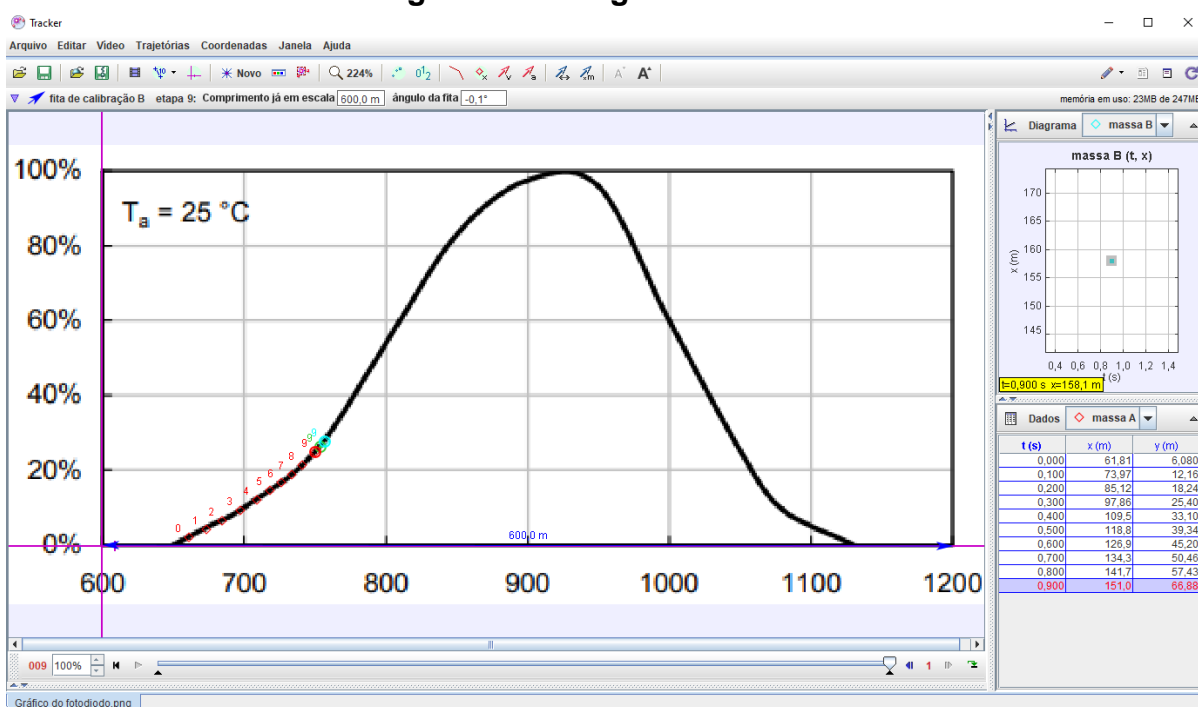
No começo da pesquisa, para determinar quais eram os fotodiodos mais apropriados para a construção do espectrômetro, nós precisamos extrair informações de determinados datasheets. Esses documentos continham apenas a representação gráfica das curvas de resposta espectral dos dispositivos e, para sermos mais precisos, precisávamos das informações numéricas dos gráficos.

Desenvolvemos um processo que fez uso de três diferentes *softwares* para processar as imagens e obter dados para gerar tabelas. O primeiro programa foi o *Tracker Video Analysis and modeling tool*, o qual permite a análise e modelagem de vídeos e imagens. Geralmente, este é utilizado para o ensino da física, e foi escolhido devido ao contato que tive com esse programa durante a graduação, facilitando assim a sua utilização neste presente trabalho. O segundo programa foi o *Microsoft Excel*, o qual foi utilizado devido a sua praticidade, que permite um manuseio dos dados obtidos nos demais *softwares*. E, por último, utilizamos o *Matlab* para realizar processamentos mais complexos.

O primeiro passo para obtermos os dados das curvas de resposta espectral foi realizar a importação da imagem contida no datasheet para o *Tracker*. No *Tracker* nós iremos alinhar os eixos do referencial do programa com o eixo do gráfico contido na imagem e, feito isso, o próximo passo é calibrar a imagem usando a “fita de calibração”, a qual define a escala de um eixo do gráfico. Por exemplo, na Fig. 18 definimos que o espaço entre as marcações 600 e 1200 tem 600 unidades. Após esse processo, os dados extraídos referentes ao eixo X estão na mesma escala da imagem. A seguir usamos a ferramenta “ponto de massa”, e vamos marcando os pontos que fazem o desenho da curva, como mostra a Fig. 18. Os pontos selecionados serão apresentados como coordenadas na aba “dados”. Por fim, copiamos esses dados para o Microsoft Excel. O número de pontos de coordenadas

por gráfico pode variar de acordo com o tamanho da curva, mas geralmente extraímos entre 60 e 120 pontos.

Figura 18 – Programa Tracker.

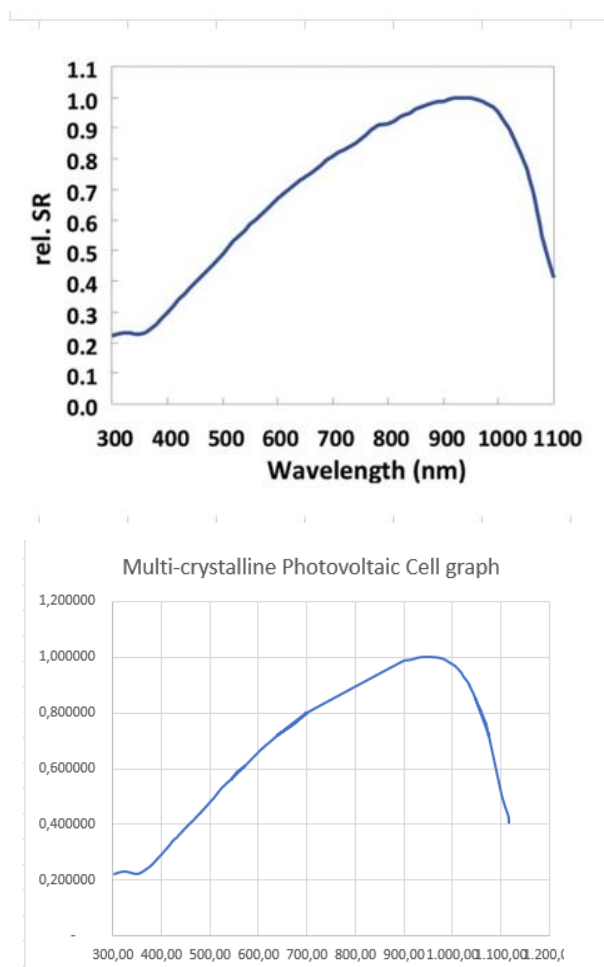


Fonte: Própria

O *Tracker* não ajusta o deslocamento no eixo X, e nem a escala e deslocamento no eixo Y. No Excel fazemos tais correções, pois, na maioria dos gráficos de resposta espectral em *datasheets* não apresentam suas origens no eixo X (não começam em 0). O mesmo vale para o Y, porém, é necessário realizar também a correção das escalas. Com esses valores ajustados, geramos um novo gráfico da resposta espectral no Excel. Podemos observar visualmente na Fig. 19 a semelhança entre o gráfico original, obtido do *datasheet*, e do gráfico elaborado a partir dos dados extraídos.

Para multiplicar diferentes curvas, é necessário que os eixos X de ambas curvas estejam na mesma escala e com a mesma resolução. Logo, foi necessário realizar uma reamostragem dos gráficos com o objetivo de equacionar as escalas e resoluções. Por uma questão de familiaridade com a ferramenta, o Matlab foi utilizado para tal procedimento.

Figura 19 – Gráfico original obtido em datasheet (inferior) e gráfico resultante dos dados extraídos (superior).



Fonte: Própria

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

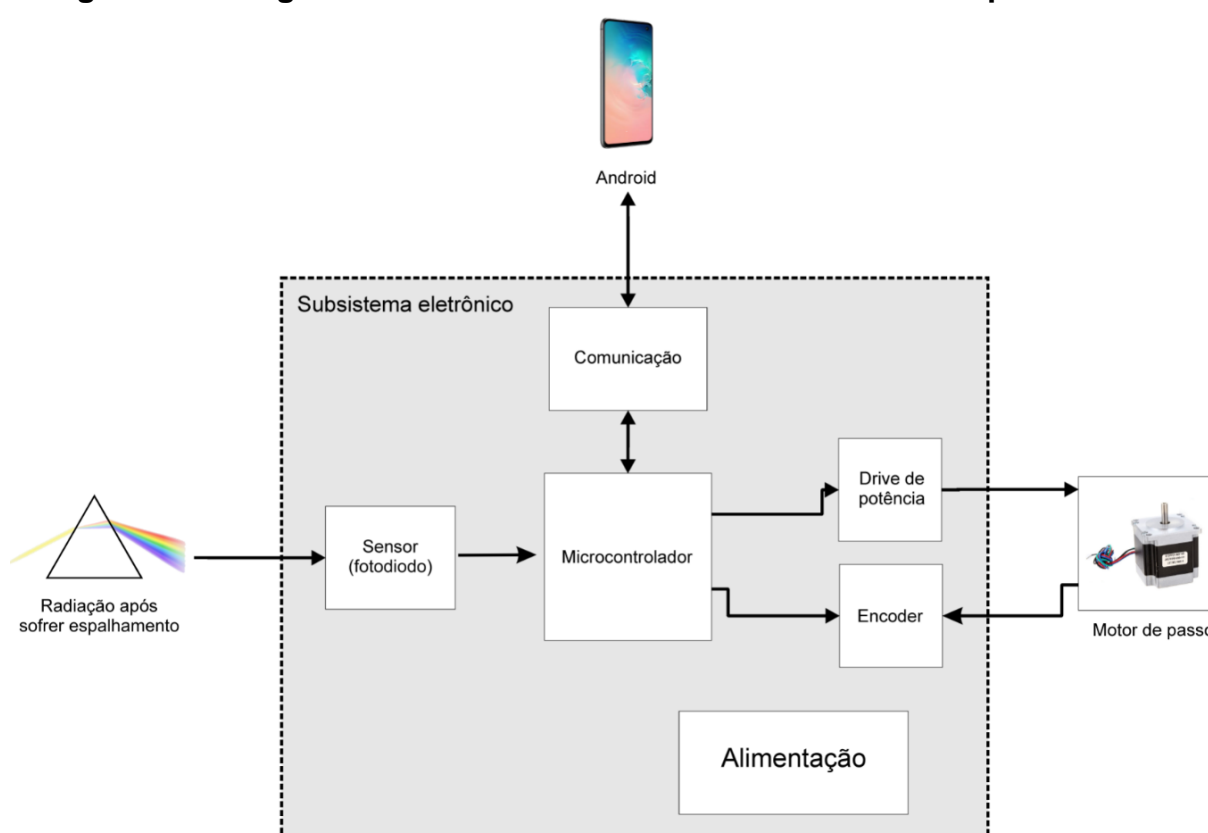
Iremos apresentar com mais detalhes o projeto do espectrômetro e seu funcionamento. Os subsistemas eletrônico, mecânico e óptico, e de software estão detalhados a seguir.

4.1 SUBSISTEMA ELETRÔNICO

Na Fig. 20 podemos ver o diagrama do subsistema eletrônico do espectrômetro proposto com suas 6 partes: (I) Sensor, (II) Driver de potência, (III) Encoder, (IV) Comunicação, (V) Microcontrolador e (VI) Alimentação. O espalhamento da luz e o motor são descritos no subsistema mecânico e óptico, enquanto o Android é descrito no subsistema de software.

(I) Sensor: Uma vez que conhecemos as faixas de absorção dos gases na atmosfera, a faixa do espectro que concentra a maior parte da radiação solar e quais as faixas mais influentes nas tecnologias utilizadas na construção dos módulos solares mais vendidos no mercado, podemos escolher, baseado nos dados, quais os modelos de fotodiodo que serão utilizados. Foram escolhidos os modelos WL-TDRW THT, da WÜRTH ELEKTRONIK e o FGA01, da THORLABS. As respostas espectrais destes fotodiodos abrangem uma faixa de 400 nm a 1700 nm. O encapsulamento de 3 mm de diâmetro e montagem “*through-hole*” permitem facilitar a prototipação. Estes foram os dispositivos de menor custo, considerando as respostas espectrais desejadas. Os valores destes, para compra unitária, são R\$ 2,92 e R\$ 345,54, respectivamente, em 22 de março de 2021, nos sites MOUSER ELECTRONICS e THORLABS.

Figura 20 – Diagrama em blocos do subsistema elétrico do espectrômetro.



Fonte: Própria

(II) Driver de potência: Será utilizado o L293D para acionar o motor de passo. Este dispositivo recebe o sinal de controle do microcontrolador, em baixa potência, e aciona o motor de passo, disponibilizando a corrente necessária para seu funcionamento. A escolha pelo motor de passo é descrita na próxima seção.

(III) Encoder: Será utilizado para identificar a posição dos fotodiodos em relação ao feixe de luz. O encoder também é utilizado para identificar a posição da cabeça de impressão em uma impressora. Neste projeto, pretende-se reaproveitar o encoder de uma impressora inutilizada. Geralmente estes dispositivos são do tipo óptico e linear. É possível que a impressora possua encoder óptico rotativo, mas, a forma de leitura da posição da cabeça de impressão é semelhante em ambos modelos.

(IV) Comunicação: A comunicação do protótipo com o Android será feita através do protocolo padrão de comunicação bluetooth. O módulo de comunicação selecionado é o HC-06, visto sua compatibilidade com o Arduino e seu baixo custo. A taxa de transmissão do protocolo de comunicação a ser adotado é de 9600 bits por segundo, que é suficiente para transmissão das informações do espectro solar captado pelo fotodiodo.

(V) Microcontrolador: podem ser selecionados diversos modelos de microcontroladores de baixo custo: O ATMEGA328P, por exemplo, visto sua aplicação na plataforma Arduino Uno. Ou o microcontrolador ESP32, que possui um poder de processamento maior que o do ATMEGA328P e já possui integrado as funcionalidades de comunicação *bluetooth* e Wi-Fi.

Além dessas duas opções de microcontroladores que podem ser utilizadas futuramente na construção do protótipo, podem também ser utilizados outros modelos de microcontroladores de baixo custo, de acordo com sua viabilidade técnica no momento da aquisição do material.

Neste trabalho, usaremos como exemplo o ATMEGA328P. O sinal recebido pelos fotodiodos, serão convertidos para digital e logo após serão transmitidos via *bluetooth* para o sistema Android. Adicionalmente, é papel do microcontrolador acionar o motor de acordo com as informações do encoder de posição. O motor será acionado, visando sempre deslocar os fotodiodos em toda a extensão da luz espalhada pelo prisma.

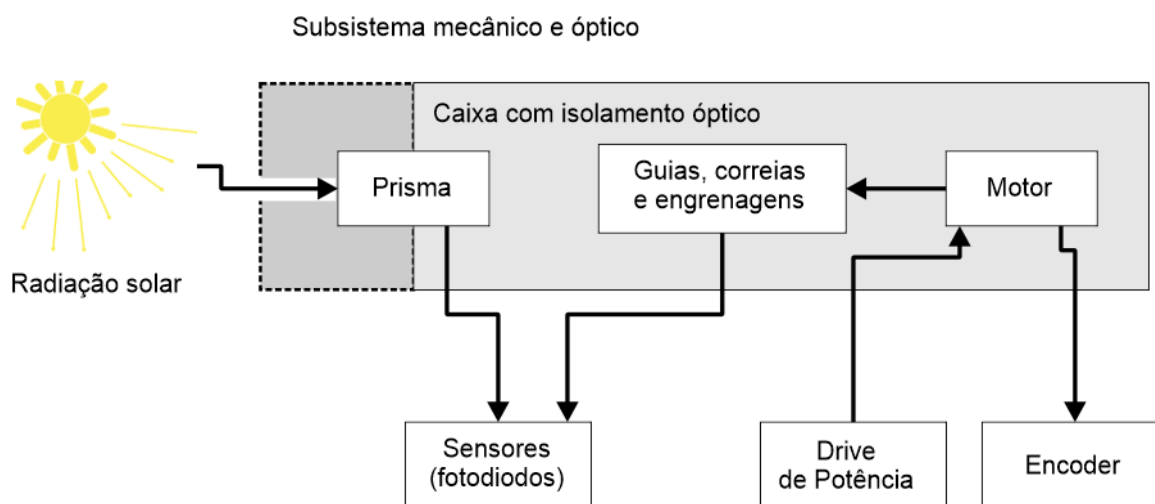
(VI) Alimentação: será utilizada uma fonte chaveada, que terá a tensão de saída e potência compatíveis com a carga do sistema, inclusive o motor. Será desenvolvida uma placa reguladora de tensão, com filtros, para alimentar o microcontrolador e as demais cargas de baixa potência.

4.2 SUBSISTEMA MECÂNICO E ÓPTICO

O protótipo proposto neste trabalho tem 4 partes fundamentais em seu subsistema mecânico e óptico. São estas: (I) Prisma óptico, (II) Caixa com isolamento óptico, (III) Guias, correia e engrenagens e (IV) Motor. A seguir é apresentado o diagrama em blocos desse subsistema.

(I) Prisma óptico: É prevista a utilização de um prisma de base retangular em uma caixa com isolamento óptico, onde nenhuma luz poderá entrar na caixa sem passar pelo prisma. O prisma vai ter o papel de refratar a luz incidente, que por sua vez vai decompor a radiação solar que passa por ele, separando-as em suas respectivas faixas. O prisma sugerido por esse trabalho é o Prisma SF10, uma vez que sua transmitância é próxima a 1 nos comprimentos de onda que vão de 500 nm a 1970 nm, ou seja, nessa faixa, a radiação solar vai passar pelo prisma de maneira quase inalterada, sem sofrer absorção significativa por parte dos materiais que compõem o prisma. Podem ser utilizados outros tipos de prismas para a construção do protótipo, desde que seja feito um levantamento do índice de refração ao longo do comprimento de onda e da transmitância do seu material. Deve-se realizar um estudo futuro sobre prismas comerciais com diversos materiais.

Figura 21 – Diagrama em blocos do subsistema mecânico e óptico.



Fonte: Própria

(II) Caixa com isolamento óptico: a ideia principal é ter duas caixas adjacentes. A primeira caixa deve ter uma pequena fenda, a qual é feita com o intuito de deixar apenas um feixe de luz passar por ela. Nessa pequena fenda, deve ser acoplado uma lente para colimação do feixe de luz que passa pela fenda, deve ser feita a análise da lente que será utilizada para realizar essa colimação em trabalhos futuros, visando tanto seu custo, quanto sua viabilidade técnica, incluindo a absorção espectral na lente. Este protótipo inicial prevê a medição apenas de radiação solar direta. No caso de radiação solar difusa, é necessário adicionar uma calota esférica difusora na entrada do sistema. Contudo, ao adicionar mais um elemento na passagem da luz, se faz necessário realizar o estudo de absorção pelo material da calota esférica.

O feixe deverá chegar até o prisma que está acoplado a segunda caixa, que chamaremos de caixa com isolamento óptico. Esta, só permite que a luz entre se passar pelo prisma, pois é isolada opticamente. Quando o feixe chega ao prisma, ele é espalhado para dentro da caixa isolada e tal radiação é captada por dois fotodiodos que estarão acoplados a uma guia.

(III) Guias, correias e engrenagens: É previsto que esse sistema de movimentação seja reutilizado de uma impressora inutilizada, contribuindo para o baixo custo do protótipo. Quando o microcontrolador envia o comando para o driver de potência, acionará o motor e este deverá mover o sistema de correias e engrenagens, fazendo os fotodiodos se moverem ao longo do guia, com o intuito de varrer toda a radiação que foi espalhada pelo prisma.

(IV) Motor: Os modelos propostos para o projeto é o de passo ou o motor DC, os quais são utilizados quando é preciso realizar movimentos com precisão. Neste caso, se faz necessário deslocar o conjunto de fotodiodos com precisão. O motor de passo tem um sistema de controle híbrido, que permite o controle preciso do ângulo de rotação do motor, deslocando-se em 1,8 graus por passo (ou menos, dependendo do motor). Em conjunto com as engrenagens redutoras, o deslocamento linear do fotodiodo será suficientemente pequeno para identificar de forma isolada os vales e picos do espectro solar de radiação. No caso do motor DC, a precisão é de acordo com o encoder. Assim como nos itens descritos anteriormente, o motor será reutilizado de uma impressora inutilizada, contribuindo para o baixo custo do

protótipo. Sugerimos então que em trabalhos futuros, da construção do protótipo, seja feita a análise de qual motor vai ser adquirido ou reaproveitado para realizar o deslocamento do fotodiodo.

4.3 SUBSISTEMA DE SOFTWARE

Este subsistema será composto pelas seguintes partes: (I) Comunicação, (II) Correção dos valores, (III) Identificação dos vales e picos, (IV) Estimação das curvas de absorção dos gases e (V) Estimação do espectro solar. O diagrama em blocos pode ser visto na Fig. 22.

(I) Comunicação: O sistema embarcado proposto para uso neste protótipo é um smartphone. Geralmente o smartphone já possui uma interface de comunicação bluetooth. O aplicativo a ser desenvolvido para o sistema operacional Android deverá receber os dados enviados pelo subsistema eletrônico, os quais são as leituras das tensões analógicas dos fotodiodos, convertidas em digital de 10 bits.

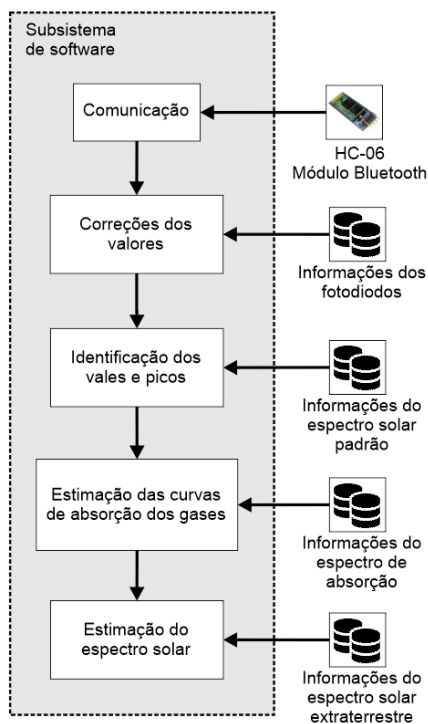
(II) Correção dos valores: Também é processado no smartphone um algoritmo para corrigir o espectro obtido devido a distorção causada pela resposta espectral do fotodiodo.

Na Figura 23(a), é possível observar o gráfico da resposta espectral relativa de um fotodiodo modelo WL-TDRW THT em função do seu comprimento de onda e na figura Figura 23(b) vemos o fator de correção adimensional em função do seu comprimento de onda. Ao multiplicar a resposta espectral do fotodiodo pelo fator de correção, obtemos um valor constante unitário. Isto é, anulamos a influência da resposta espectral do fotodiodo na análise do espectro da radiação incidente. O fator de correção foi obtido aplicando uma função inversa à resposta espectral do fotodiodo, a qual foi extraída conforme descrito na seção 3.3.

(III) Identificação dos vales e picos: o smartphone recebe os dados gerados pelo fotodiodo, em conjunto com o encoder, e então identifica os vales e os picos do espectro gerado. O smartphone vai procurar por vales e picos próximos a faixas pré-definidas, definidas a partir de pontos de mínimos e máximos dos padrões de absorção dos gases na atmosfera. Este item, junto com os dois próximos, compõem a principal inovação deste projeto, visto que, a partir das bases de conhecimento citadas, é possível reduzir os pontos analisados e a precisão dos sensores a fim de reconstruir o espectro solar. Isto é, há uma diminuição no investimento em hardware devido a uma aplicação das bases de conhecimento.

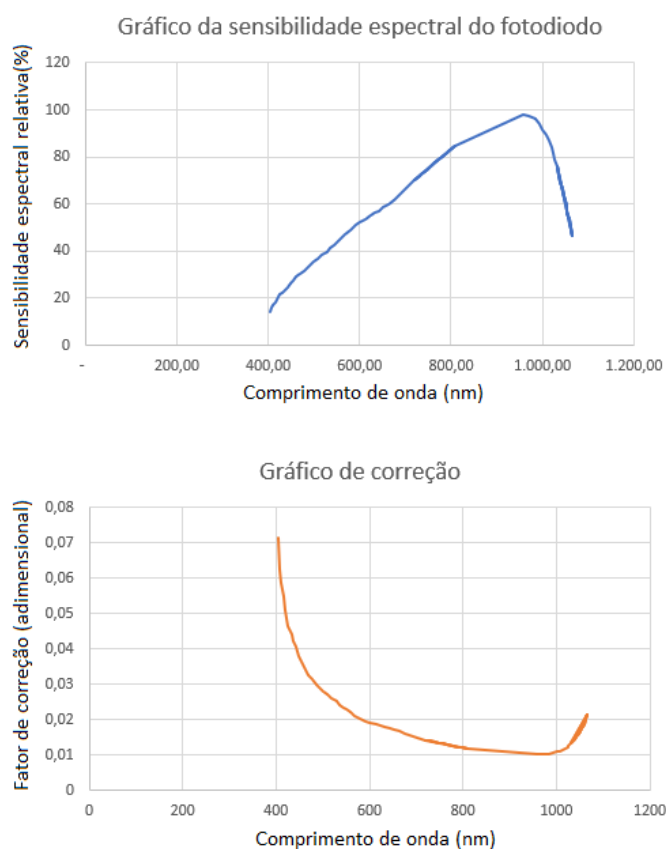
(IV) Estimação das curvas de absorção dos gases: Com o espectro corrigido e os vales e picos identificados, o próximo passo para o smartphone é estimar as curvas de absorção dos gases. Como já dito anteriormente, quando medimos as principais faixas e intensidades de absorção da radiação para cada gás, é possível estimar as curvas completas de absorção para estes gases.

Figura 22 – Diagrama em blocos do subsistema de software do espectrômetro.



Fonte: Própria

Figura 23 – (a) Resposta espectral relativa do fotodiodo modelo WL-TDRW THT e (b) fator de correção.



Fonte: (a) adaptação de Kingbright, 2018. (b) Própria.

(V) Estimação do espectro solar: O espectro solar incidente na superfície terrestre pode ser estimado quando são conhecidas as curvas da radiação solar extraterrestre e as curvas de radiação absorvida pela atmosfera. Além das respostas espectrais de todos os componentes ópticos envolvidos (fotodiodo, lentes, prisma, etc.). O espectro da radiação extraterrestre modelado na etapa anterior está disponível para uso. E a absorção atmosférica também é estimada na etapa anterior. Logo, o smartphone fará uso dessas curvas de absorção dos gases, que foram estimadas, e multiplicar pelo espectro de radiação solar extraterrestre. Após essa multiplicação, o gráfico resultante será a estimativa do espectro solar de radiação naquele local.

O smartphone foi escolhido devido a sua disponibilidade durante a pesquisa. Esse sistema embarcado possui poder de processamento maior que microcontroladores de baixo custo e diversos sensores e interfaces de comunicação, inclusive o *bluetooth* e Wi-Fi. A comunicação com a internet, o uso de sensores, como o GPS, e a disponibilidade de informações, como data e hora, entre outros recursos, poderão ser adicionados para aperfeiçoamento do sistema. Poderíamos, por exemplo, obter automaticamente através da internet a curva do espectro extraterrestre de acordo com a localização geográfica, data e hora. Seria possível também enviar dados das medições realizadas para um banco de dados na nuvem, desde que o sistema possua conexão com a internet. Essas possibilidades podem ser analisadas em trabalhos futuros. Inclusive, não é foco deste trabalho, mas se necessário realizar medições ao longo de dias ou meses, é possível controlar o sistema e ler os dados gerados pela internet, sem o auxílio de smartphone.

Sugerimos também em trabalhos futuros que as medições realizadas pelo protótipo sejam comparadas com outro espectrômetro disponível no mercado, a fim de identificar inconformidades nos dados do protótipo e aperfeiçoar o algoritmo desenvolvido para a estimação do espectro de radiação solar.

É estimado que o algoritmo a ser executado no sistema Android requirite uma baixa quantidade de recursos computacionais, inclusive com dados em ponto flutuante. Além disso, há ampla disponibilidade para aquisição e baixo custo em relação a outros sistemas embarcados com capacidade computacional e periféricos semelhantes. O algoritmo a ser executado no Android é leve computacionalmente, o que implica que poderá ser aplicado nos smartphones disponíveis no mercado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo o estudo da viabilidade e o projeto para posterior construção de um espectrômetro de baixo custo, para analisar a radiação solar com o intuito de identificar quais os materiais utilizados na construção dos módulos fotovoltaicos são mais eficientes para utilização em usinas solares, de acordo com sua localização e condições atmosféricas.

Inicialmente, foi realizado um estudo sobre o espectro da radiação solar, tanto a incidente na superfície terrestre como a extraterrestre, e foram analisados quais os fatores que podem provocar a alteração do espectro de radiação dentro da atmosfera. Em seguida, o estudo voltou-se para a análise dos gases que constituem nossa atmosfera, uma vez que foi constatado que o espectro da radiação que chega a nossa superfície sofre variações devido a concentração destes gases.

Em paralelo, também foi realizado um estudo sobre a sensibilidade espectral de alguns materiais utilizados na construção de módulos fotovoltaicos. A ideia inicial foi verificar quais tecnologias eram mais utilizadas no mercado e, a partir desse estudo, fazer uma análise da sensibilidade espectral desses materiais. Ao comparar a radiação solar incidente na superfície terrestre com essa resposta espectral dos módulos fotovoltaicos, é possível obter as faixas do espectro mais influentes na conversão da energia solar em elétrica.

Essa abordagem foi testada ao longo da pesquisa. Inicialmente, estudamos o uso de vários fotodiodos com picos de resposta em vários comprimentos de onda, tais picos predeterminados a partir do estudo da sensibilidade espectral e da radiação solar. Esse método apresentou custo elevado para a aquisição dos fotodiodos e a maior parte dos fotodiodos vendidos no mercado não possuem uma largura de absorção estreita o suficiente, que servisse para a construção do protótipo.

Foi estudado em seguida o uso de filtros ópticos passa-faixa para reduzir a largura de absorção do conjunto fotodiodo + filtro, porém, verificamos que as características de absorção do conjunto ainda não seriam suficientemente estreita para servir na construção do protótipo.

Por fim, foi proposto neste trabalho a construção de um espectrômetro, baseado em prisma para espalhamento da luz. Esse sistema foi proposto baseado nos espectrômetros comerciais, porém, utilizando diferente sensor óptico. Como foi visto no trabalho, ao invés de usarmos um sensor CCD linear de 1024, 2048 ou mais medições, foi sugerido utilizar dois fotodiodos, com resposta espectral na faixa de 400 a 1700 nm, sendo deslocado mecanicamente e varrendo toda a luz espalhada pelo prisma. A partir dessa leitura, iremos, através de ferramentas computacionais, estimar as curvas de absorção dos gases naquela região, e, conhecendo esses valores e a radiação solar extraterrestre, poderemos estimar o espectro de radiação solar incidente na superfície naquela região.

O custo final do projeto foi reduzido, pois, iremos utilizar somente dois fotodiodos e boa parte do sistema mecânico pode ser reutilizado de uma impressora inutilizada. Com a redução nos custos com o hardware dos sensores, reduzimos os custos para construção do equipamento, porém, se faz necessário utilizar bases de conhecimento para compensar a redução dos pontos adquiridos do espectro solar. Ou seja, há uma diminuição no investimento em hardware devido a uma aplicação das bases de conhecimento. Essa inovação será objeto de possível solicitação de patente visto que, até o atual estado desta pesquisa, não foram identificados outros trabalhos que estimem o espectro da radiação solar utilizando a mesma técnica proposta neste trabalho.

Inicialmente foi planejada a construção do espectrômetro. Porém, logo no início dos estudos, foi percebido que seria necessário um estudo teórico mais aprofundado de forma que o foco deste trabalho fosse a fundamentação teórica do sistema. Adicionalmente, o período de desenvolvimento deste TCC coincidiu com o período da pandemia por COVID-19, que impossibilitou o uso dos laboratórios do Campus Pesqueira.

A partir dos dados levantados é possível concluir que existe viabilidade técnica e econômica para a construção de um espectrômetro, de acordo com os conceitos apresentados.

Por fim, com base nos referenciais teóricos apresentados neste trabalho, é possível concluir que existe a possibilidade dessa produção ser utilizada em disciplinas como laboratório de ensino de física e física experimental, pois, o presente trabalho apresenta a relação entre a teoria e a prática, onde usando conhecimento da Física e da Meteorologia é possível desenvolver experimentos de baixo custo para observar os fenômenos físicos de difração, absorção e refração, bem como o estudo do espectro eletromagnético da radiação solar. Vale ressaltar que não é necessário que o protótipo funcione com precisão similar ao de espectrômetros comerciais para que seja aplicado ao ensino de física.

Como trabalho futuro, sugerimos a elaboração dos projetos mecânico, óptico, eletrônico e de software do sistema para possibilitar a compra dos materiais e montagem do protótipo. Cada um destes projetos pode ser desenvolvido em trabalhos independentes de TCC. E, em paralelo, será verificada a viabilidade para solicitação de patente. Caso viável, procederemos com o registro da propriedade intelectual.

REFERÊNCIAS

- ABELLA, A. et al. **Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (Photovoltaic) technologies: The case of four specific sites.** Energy, Vol. 67, p. 435-443, janeiro de 2014.
- AMORIM, Bruna. **Absorção da radiação por aerossóis na Amazônia.** 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ASTM G173-03, **Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- BIRD, E; HULSTROM, L; U.S Department of Energy. **Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces.** Colorado, 1981.
- BP810 (Limited) **Near-IR Bandpass Filte. MIDOPT**, 2020. Disponível em: <<https://midopt.com/filters/bp810/>>. Acesso em: 24, janeiro de 2020.
- CARLESSO, Franciele et al . **Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total.** Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 41, n. 2, e20180220, 2019 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180611172019000200418&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 março. 2021. Epub Jan 07, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0220>>.
- CHIPLED. **Datasheet: SFH 2700 FA A01.** OSRAM Opto Semiconductors, 2020.
- DELSOLAR. **Datasheet: D6P Multi-crystalline Photovoltaic Cell.** QWMD-03-03-01 Ver. 1.4, 2003.
- ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J.. **A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre.** Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 23, n. 3, p. 276-283, Sept. 2001 .

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172001000300004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01, maio de 2021.

FAN, Fudong. "**Band gap**". **Encyclopedia Britannica**, 16 julho. 2019, Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/band-gap>>. Acesso em: 29 janeiro de 2021.

FERREIRA, Tábata et al. Título do artigo. **Sistema para caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos**. Revista Brasileira de Energia Solar, Vol. 3, p. 47-53, julho de 2012.

GAO, Bo-Cai. Kathleen B. Heidebrecht, Alexander F.H. Goetz. **Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data**. Sensing of Environment, Vol. 44, páginas 165-178, 1993.

GONZALES, Rolando e Silva, Ennio. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas**. 1998. 101. FÍSICA – Instituto de Física "Gleb Wataghin", UNICAMP, 1998.

HUANG, Gan. Curt, Sara. Wang, Kai. Markides, Christos N. **Challenges and opportunities for nanomaterials in spectral splitting for high-performance hybrid solar photovoltaic-thermal applications: A review**, Nano Materials Science, Vol. 2, páginas 183-203, 2020.

KINGBRIGHT. **Datasheet: WP7113PD1BT/BD-P22 Photodiode**. DSAO8752 / 1101026249 Rev No: V.4, 2018.

LATORRE, M. Et al. **Correção atmosférica: Conceitos e fundamentos**. Espaço & Geografia, Vol. 5, 153:178, 2002.

LIOU, Kuo-Nan. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. University of Utah, Salt Lake City, Utah: INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES, VOLUME 26, 1980.

QCELLS. **Datasheet: Q6LMXP3-G3_2013-04_Rev01_EN**. Hanwha Q CELLS GmbH, 2013.

SOUZA, Rui & Reboita, Michelle & Werle, Ana & Costa, Eliane. (2016). **Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil. 13. 10.5216/reec.v13i1.41448.

WOODHOUSE, M. Jones-Albertus, R. Feldman, D. Fu, R. Horowitz, Kelsey, Chung, D. Jordan, D. Kurtz, S. **On the Path to SunShot: The Role of Advancements in Solar Photovoltaic Efficiency, Reliability, and Costs**. Título da Revista, Golden, Colorado. National Renewable Energy Laboratory. 2016.