



## DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA FINS DIDÁTICOS

Carolina Melo Linhares\*<sup>1</sup>, Isadora Almeida Soares<sup>1</sup>, Carlos Augusto Guimarães Medeiros<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EENG/PUC Goiás – Escola de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de Goiás

**Resumo** - Este artigo tem o intuito de apresentar o desenvolvimento de um protótipo de um simulador solar de baixo custo, a fim de integrar uma futura disciplina de Sistemas Fotovoltaicos, no curso de graduação em Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia (EENG), da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Esse simulador evita impedimentos de ordem prática para a execução de experimentos didáticos, considerados desfavoráveis, relativos ao ambiente externo, tais como chuva, dias nublados, turno noturno de aulas, entre outros.

**Palavras-Chave** – Protótipo, Simulador Solar, Sistemas Fotovoltaicos.

### DEVELOPMENT OF A LOW COST SOLAR SIMULATOR FOR DIDACTIC PURPOSES

**Abstract** - This work intends to develop a prototype of a low-cost solar simulator in order to integrate a future discipline of Photovoltaic Systems, in the course of degree in Electrical Engineering, School of Engineering of the Pontifical Catholic University of Goiás. This simulator avoids practical to the execution of didactic experiments, considered unfavorable, related to the external environment, such as rain, cloudy days, night shift of classes, among others.

**Keywords** – Photovoltaic Systems, Prototype, Solar Simulator.

### I. INTRODUÇÃO

Em uma era de recursos limitados, a energia fotovoltaica é uma energia renovável baseada em uma fonte primária praticamente ilimitada em nossa escala de tempo: o Sol.

Esse grande potencial energético está sendo explorado no mundo e no Brasil e, devido à lei de mercado da oferta e da procura, tem-se observado quedas de preço sistemáticas, ficando essa tecnologia cada vez mais acessível à população, que pode primar por adquirir uma fonte de energia limpa.

Para acompanhar a evolução do sistema, é muito importante o estudo na Engenharia, trazendo uma base teórica e prática para a execução de projetos e processos. A função do engenheiro no sistema é de suma importância, pois é ele o responsável por analisar o mercado, a necessidade das implantações, por dimensionar os materiais, analisar os dados

para que o sistema tenha a melhor eficiência possível, atender as solicitações do cliente, garantindo assim a melhor produtividade e os menores custos ambiental e financeiro. Também é de sua atribuição executar toda a documentação de acesso à distribuidora de energia na localidade da instalação de um sistema de geração distribuída, por exemplo.

Assim, é de extrema importância a educação, o aprendizado e as boas práticas de eficiência energética, bem como, o emprego de sistemas de geração renováveis como o fotovoltaico, eólico e outros aliados da sustentabilidade, em seu mais profundo sentido, que engloba todas as questões socioambientais. E, é de intuito da educação elaborar procedimentos e materiais didáticos, obter e disseminar informações, ideias para para elaboração de relatórios laboratoriais, montagem e execução de experimentos.

Diante disso, o propósito deste trabalho é realizar o desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo para auxiliar na didática do processo de ensino-aprendizagem na área de sistemas fotovoltaicos, em condições de laboratório, isto é, em ambiente fechado (*indoor*).

### II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a finalidade de fornecer alguns conceitos fundamentais necessários para reforçar a base teórica do trabalho, esta seção traz definições e explicações relacionados ao tema proposto.

#### A. Radiação Solar

O termo *radiação solar*, a radiação que emana do Sol na forma de ondas eletromagnéticas, é usado de forma genérica e pode ser referenciado como potência ou energia [1]:

A *irradiância solar* ( $W/m^2$ ) é o fluxo de potência radiante por unidade de superfície sobre um dado plano;

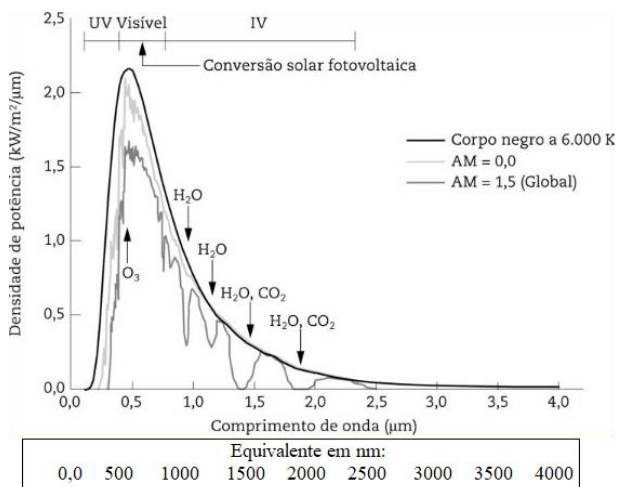
A *irradiação solar* ( $Wh/m^2$ ) é a energia por unidade de superfície de um dado plano, obtida pela integração da irradiância durante um intervalo de tempo (como uma hora, um dia ou um ano).

A radiação solar, como onda eletromagnética, pode ser caracterizada por um comprimento de onda ( $\lambda$ ), velocidade da luz ( $c$ ) e frequência, sendo  $\lambda = c/f$ . Fora da atmosfera (AM0,0), tem sua faixa espectral em cerca de 100 nm a 3000 nm [2] com densidade de potência espectral máxima em 550 nm, que corresponde à luz verde-amarelada. Nota-se também que a intensidade e a composição espectral são diferentes na

\*carolinamlinhares@outlook.com

superfície terrestre (AM1,5) devido a fatores atmosféricos e meteorológicos, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Espectro da radiação solar fora da atmosfera (AM0,0), na superfície (AM1,5) e de corpo negro a 6000 K, com adaptação [3].



### B. Conversão Fotovoltaica e Influência Espectral

A conversão fotovoltaica consiste, essencialmente, na transformação direta da energia radiante em eletricidade. Pela física quântica, a radiação (onda eletromagnética) pode ser concebida como uma transmissão de fóton, sendo a energia de cada fóton proporcional à frequência da onda, isto é, dada por  $E_{Fóton} = hf$ , ou,  $E_{Fóton} = hc/\lambda$ , onde  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Js é a constante de Planck.

O efeito fotovoltaico que acontece em determinados materiais semicondutores, decorre do fato de que estes absorvem a energia dos fótons, o que propicia a produção de corrente e tensão elétrica em uma célula fotovoltaica (unidade básica desse processo).

Assim, pode-se extrair potência e energia elétrica dos terminais da célula (ou usualmente de um conjunto delas chamado de módulo fotovoltaico), para uso em uma carga consumidora. Dependendo das características espectrais de absorção do material empregado, somente fótons com certa energia, isto é, relacionados a determinadas frequências (ou determinados comprimentos de onda), conseguem estimular os átomos da célula para que possa ocorrer a conversão de energia fotovoltaica.

### C. Condições-padrão de ensaio (STC)

Nas condições padrão de ensaio (em inglês, *Standard Test Conditions - STC*) são definidas as características elétricas para a certificação de módulos fotovoltaicos como a potência máxima de saída (Wp), entre outras. As condições de STC são definidas pela *Underwriters Laboratories* na UL 1703 [4]. Correspondem a uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$ , incidência normal da radiação solar e espectro obtido com uma massa de ar de 1,5 em um dia claro (AM1,5).

### D. Simuladores Solares

Os simuladores solares são capazes de propiciar, em ambiente fechado (*indoor*), uma radiação artificial que se aproxime da solar e, entre outras vantagens, evitam condições meteorológicas adversas para a execução de ensaios.

Em geral, esses simuladores solares devem possuir lâmpadas e outros aparatos que simulam a radiação solar, de acordo com padrões internacionais (por exemplo estabelecidos pelas normas da International Electrotechnical Commission - IEC), sendo importante controlar parâmetros como a intensidade da radiação, distribuição espectral, uniformidade espacial, estabilidade no tempo, temperatura, entre outros. Vale destacar que esses modelos de simuladores são de alto nível tecnológico e têm custos muito elevados.

Assim, o princípio deste trabalho foi estudar e elaborar algo na linha de segmento de simuladores solares de baixo custo e, para efeito de ensaios didáticos de módulos fotovoltaicos [5-6]. No artigo usado para estudo como refere-se em [6] foi apresentado um simulador com a utilização de lâmpadas incandescentes comuns, mas em grande quantidade (36 lâmpadas de 200 W, ou seja, 7200 W de potência elétrica de entrada).

Para evitar tantas lâmpadas, foi estabelecido durante o desenvolvimento deste trabalho o uso de lâmpadas incandescentes halógenas como mostrado a seguir.

## III. DESENVOLVIMENTO

Nesta fase do projeto, um simulador solar simplificado está sendo montado e ajustado por ensaios, isto é, baseado em testes práticos (método empírico), porém, balizados por experiências de simuladores solares de baixo custo, citadas na seção anterior, tendo sido acrescidos também conhecimentos teóricos (fundamentação científica).

Alguns testes preliminares foram realizados com uma lâmpada de vapor de sódio de 400 W mista e com uma e depois duas lâmpadas halógenas metálicas de 500 W, em ambiente aberto ou parcialmente fechado (sem caixa), obtendo-se resultados insatisfatórios. Assim, decidiu-se pelo uso de uma caixa associada a outros elementos descritos a seguir.

### A. Materiais Utilizados

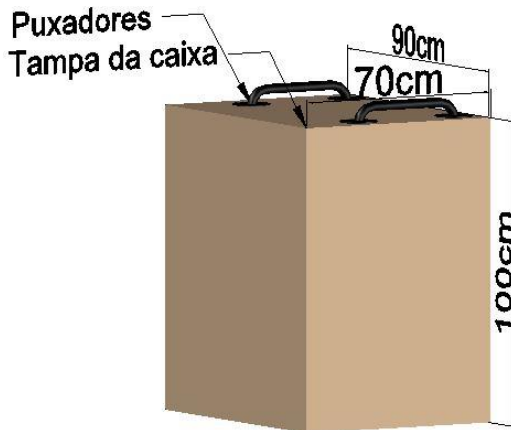
- Módulo fotovoltaico: fabricante Kyocera, modelo KS20T,  $0,520 \times 0,352$  m, 20 Wp, policristalino, corrente de curto-circuito  $I_{sc} = 1,26$  A e tensão de circuito aberto  $V_{oc} = 21,7$  V.
- Lâmpadas e refletores: foram utilizadas lâmpadas incandescentes halógenas “palito”, temperatura de 2700 K, 500 W, 220 V, fabricante Golden, colocadas em refletores do fabricante Elgin 300/500 W, 127 V ou 220 V para uso das lâmpadas halógenas (base R7s).
- Caixa: para o melhor resultado desse trabalho foi usada uma caixa de *Medium Density Fiberboard* (MDF), cujas dimensões estão mostradas na Figura 2.
- Sensores de radiação: foi usado o sensor de radiação solar (piranômetro) do fabricante Davis, modelo 6450, para medir a irradiância incidente sobre os módulos. Consiste de um transdutor de fotodiodo de silício, com resposta espectral de 400 - 1100 nm e faixa 0 a  $1800 \text{ W/m}^2$  (saída correspondente 0 a 3 Vcc). Também foi testado o solarímetro Icel SP-2000 (até  $1999 \text{ W/m}^2$ ), mas o fabricante não informa a resposta espectral no manual do equipamento.
- Multímetros: multímetros digitais FLUKE 115 e multímetro Minipa ET-2042E.
- Disjuntor termomagnético: do fabricante Siemens de 6 A foi usado para o circuito de montagem.

### B. Preparação e Execução de Testes

Nesta etapa do trabalho as medições se concentraram na corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) de somente um módulo fotovoltaico. Essas grandezas têm uma relação importante com a radiação incidente:  $I_{sc}$  aumenta linearmente com o aumento da intensidade da radiação incidente no plano do módulo fotovoltaico e,  $V_{oc}$ , tem uma variação não-linear e satura a partir de certo nível [3].

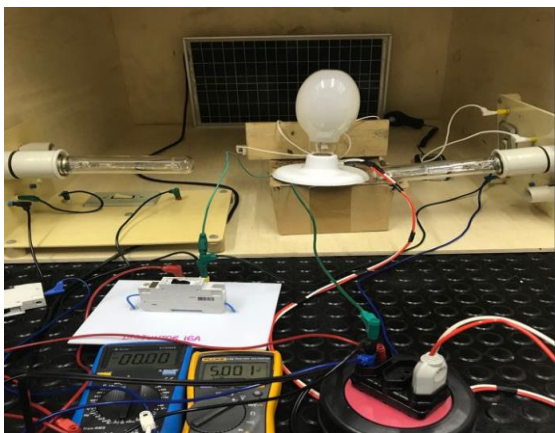
A opção por usar uma caixa fechada se deve ao fato de esta concentrar melhor a luz e evitar ofuscamento dos usuários. Além disso, testes preliminares em aberto (sem caixa) mostraram dificuldades em uniformizar a radiação sobre o módulo fotovoltaico usado, resultando em valores de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  insatisfatórios. As dimensões da caixa permitem realizar experimentos com células fotovoltaicas em um ou mais módulos de pequeno porte.

Figura 2: Caixa de MDF. Fonte: Própria.



Para verificar uma radiação adequada a ser oferecida pelo simulador solar, foram feitos alguns testes, tentando inclusive misturar lâmpadas diferentes, porém sem obtenção de resultados satisfatórios até esta etapa do trabalho. Por exemplo, foram usadas no ensaio ilustrado na Figura 3, alternativas com duas lâmpadas de vapor de sódio 400 W, e duas lâmpadas halógenas “palito” 500 W, e duas lâmpadas halógenas 500 W.

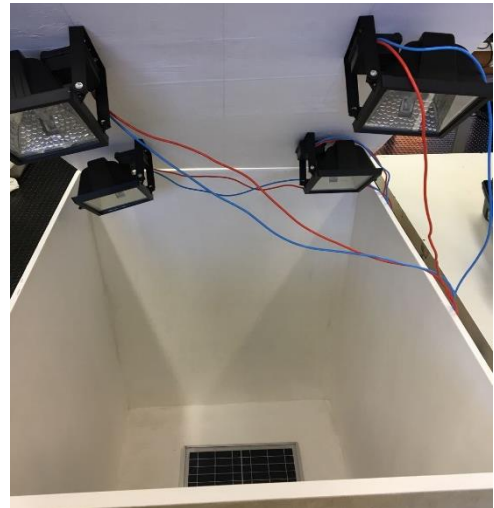
Figura 3: Ensaio com diferentes lâmpadas. Fonte: Própria.



Para melhorar a reflexão da luz, o interior da caixa foi pintado com tinta branca (“white acetinado”), a fim de obter maiores valores de radiação sobre o módulo fotovoltaico.

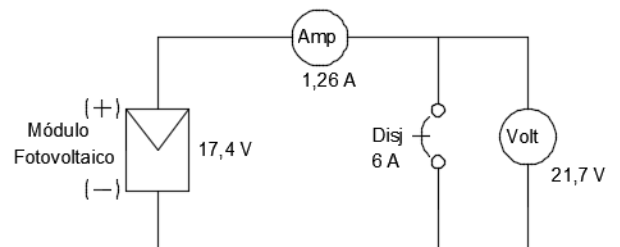
Assim, depois de vários testes foram utilizadas quatro lâmpadas halógenas “palito” de 500 W, colocadas em refletores na tampa da caixa, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Lâmpadas e refletores na tampa da caixa. Fonte: Própria.



Para o teste do módulo Kyocera foi necessário fazer uma montagem usando um amperímetro e um voltímetro a fim de verificar a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), ver esquema de ligações na Figura 5.

Figura 5: Montagem para obter  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ . Fonte: Própria.



Foram também realizados experimentos em ambiente externo (*outdoor*), no estacionamento da Área 3 da PUC Goiás, sendo usado o solarímetro (Icel SP-2000), como ilustra a Figura 6.

Figura 6: Montagem do módulo na horizontal. Fonte: Própria.





Na Tabela I encontram-se os dados obtidos destes testes sob o Sol, em horários diferentes, para verificação da relação entre a irradiância e a Isc, que, conforme a teoria, mostrou-se praticamente proporcional.

Tabela I: Testes *outdoor*, utilizando o solarímetro. Fonte: Própria.

Experimentos <i>outdoor</i> - solarímetro					
Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	608	1003	822	741	568
Isc (A)	0,81	1,24	1,2	1,04	0,72
Voc (V)	21,55	21,65	21,09	21,57	21,46
Temperatura (°C)	29,1	35	37	34,9	23,4
Horário	09:47	11:40	13:02	14:30	15:45

Um dos obstáculos encontrados durante o trabalho, foi que, além de se precisar obter uma lâmpada cuja radiação sensibilizasse adequadamente o módulo, que também sensibilizasse o solarímetro disponível, o que não se constatou. Para superar esse problema, a solução encontrada foi usar o piranômetro supramencionado (Davis, modelo 6450) e mostrado na Figura 7. Neste caso, é necessário transformar sua saída analógica (com 1,67 mV por W/m<sup>2</sup>) para digital, no valor em escala da irradiância. Para isso, utilizou-se uma placa microcontrolada Arduino UNO.

Figura 7: Sensor solar Davis 6450. Fonte: Própria.



A partir deste ponto, em que o método empírico apontou resultados apreciáveis de Isc e Voc, tornou-se conveniente verificar, com uma melhor consistência teórica, se a aplicabilidade do simulador solar e o método proposto estão coerentes. Para tanto, é considerada uma comparação entre:

- espectro da radiação solar;
- sensibilidade espectral do sensor solar;
- sensibilidade espectral do módulo fotovoltaico;
- espectro das lâmpadas halógenas (com T = 2700 K).

### 1) Espectro da radiação solar

O espectro solar AM0,0 (fora da atmosfera) e o AM1,5 (na superfície) foram ilustrados pela Figura 1. Fora da atmosfera encontra-se na faixa de 100 a 3000 nm, enquanto que na superfície terrestre entre 100 e 2500 nm. A Tabela II mostra a distribuição percentual em faixas de comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação extraterrestre.

Tabela II: Distribuição do espectro da radiação solar que incide na atmosfera extraterrestre. Fonte: [12].

Tipo:	Ultravioleta	Visível	Infravermelho
Faixa de $\lambda$ :	Menor que 380 nm	Entre 380 e 780 nm	Maior que 780 nm
Densidade de Potência:	7%	47,3%	45,7%

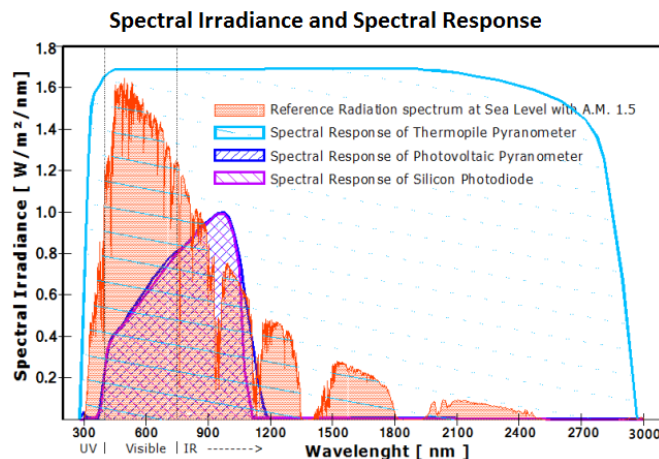
Vale ressaltar que, em um simulador solar, interessa-se por produzir a radiação na faixa espectral da radiação solar a nível do solo [6].

### 2) Sensibilidade espectral do sensor solar

A sensibilidade espectral do sensor solar varia de 400 a 1200 nm. Entretanto, não consta a curva espectral do mesmo.

A Figura 8 mostra curvas típicas para piranômetros de diversas tecnologias, incluindo o tipo usado com fotodiodo de silício, com curva de cor roxa. Nota-se uma boa concordância com a informação de sua faixa espectral (400 a 1200 nm).

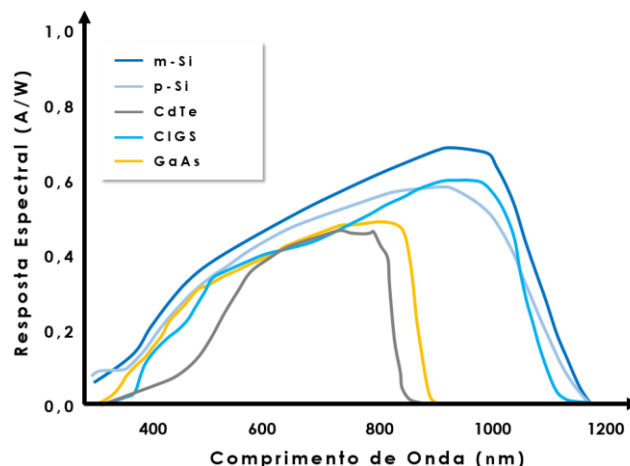
Figura 8: Espectro de diferentes piranômetros. Fonte [11].



### 3) Sensibilidade espectral do módulo fotovoltaico (FV)

Esta informação não é fornecida em sua folha de dados. Porém, como ele é do tipo p-Si, ou seja, policristalino (*multicrystal photovoltaic*), supõe-se que sua faixa espectral possa ser semelhante à típica mostrada na Figura 9, estendendo-se até aproximadamente 1200 nm.

Figura 9: Respostas espectrais de tecnologias FV. Fonte: [7].



### 4) Espectro das lâmpadas

Como exposto em [6], o espectro de lâmpadas incandescentes pode ser obtido de forma aproximada a de um corpo negro com a mesma temperatura da lâmpada, aplicando-se a Lei de Planck. Empregando-se este raciocínio, pode-se obter o conteúdo espectral das lâmpadas usadas. De [8] obtém-

se a expressão (1) que fornece a distribuição espectral da radiação de um corpo negro.

$$E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

Onde:

- $E_{n\lambda}$  - Poder emissivo de um corpo negro por unidade de comprimento de onda,  $W/(m^2 \mu m)$ .
- $\lambda$  - Comprimento de onda,  $\mu m$ .
- $T$  - Temperatura, K.
- $C_1$  - Constante,  $C_1 = 3,743 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$ .
- $C_2$  - Constante,  $C_2 = 1,4387 \times 10^4 \mu m \cdot K$ .

A Figura 10 e também a Figura 11 (*zoom*) mostra o resultado obtido com a temperatura da lâmpada usada,  $T = 2700$  K.

Figura 10: Poder emissivo espectral de um corpo negro a 2700 K. Fonte: Própria.

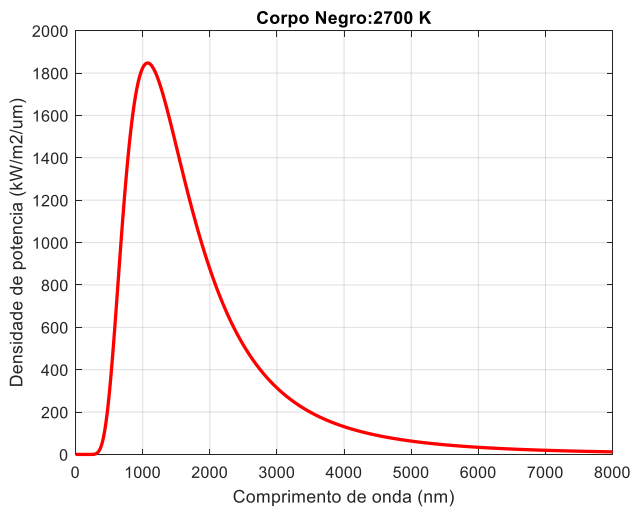
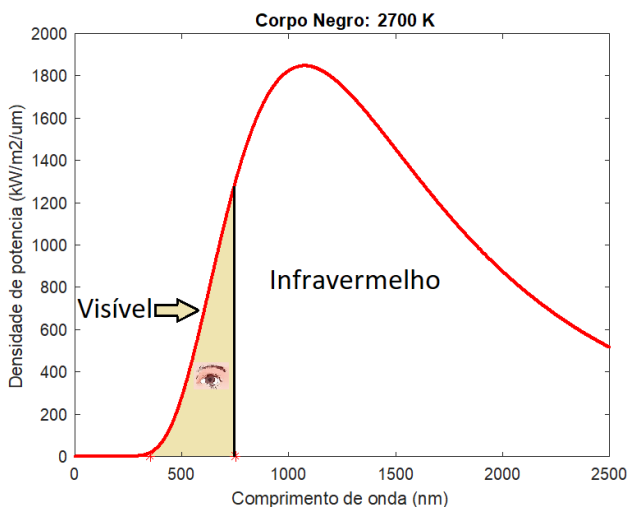


Figura 11: Espectro ( $T = 2700$  K) em *zoom*. Fonte: Própria.



Assim, obteveram-se as características aproximadas de radiação deste emissor como mostrado na Tabela III.

Tabela III: Composição espectral da lâmpada. Fonte: Própria.

Faixa:	Composição:
Ultravioleta, pela Figura 10 considerado de 280 a 350 nm	0,02%
Visível, considerado de 350 a 750 nm	7,13%
Infravermelho, pela Figura 10 de 750 a 8000 nm	92,85%
Total, pela Figura 10 considerado de 280 a 8000 nm	100%
Na faixa do sensor solar considerado de 400 a 1100 nm	26,89%
Na faixa do módulo solar considerado até 1200 nm	33,08%

Tanto a Figura 10 quanto a composição apresentada na Tabela III estão condizentes com explicações dadas em [9], que menciona que a maior parte da energia emitida por estas lâmpadas é dissipada como calor no infravermelho; e, em [10], um catálogo de fabricante, que menciona que suas lâmpadas halógenas oferecem cerca de 90% da energia na faixa do infravermelho. O *zoom* até 2500 nm da Figura 11 ressalta isso. Baseado neste estudo, mostra-se de forma resumida na Tabela IV uma comparação entre as faixas espectrais analisadas.

Tabela IV: Faixas espectrais dos elementos usados. Fonte: Própria.

Item:	Faixa espectral:
Solar em AM0,0 (fora da atmosfera)	100 a 3000 nm
Solar em AM1,5 (na superfície)	100 a 2500 nm
Lâmpadas (aproximado), com $T = 2700$ K	280 a 8000 nm
Sensor solar	400 a 1100 nm
Módulo FV (p-Si)	Aprox 1200 nm

Ao analisar essas informações, conclui-se que a radiação artificial proposta não atende bem ao espectro solar. Porém, por uma interseção entre os gráficos das Figuras 8, 9 e 10 e, pela Tabela III, nota-se que a radiação incidente é parcialmente aproveitável, por sensibilizar, em parte, tanto o sensor como o módulo FV. Ressalta-se, no entanto, que a não coincidência entre a densidade de potência espectral da lâmpada, e a resposta espectral do módulo FV, faz com que nem toda a energia seja aproveitada.

Do exposto, depreende-se a necessidade do uso de lâmpadas relativamente potentes para aumentar a intensidade da radiação incidente e se obter valores de tensão e corrente mais satisfatórios na saída do módulo FV. Isso foi confirmado com as quatro lâmpadas usadas totalizando 2000 W (potência elétrica de entrada).

Assim, antes de finalizar essa etapa da pesquisa, realizaram-se ensaios *outdoor* utilizando a mesma irradiância incidente sobre o piranômetro e sobre o solarímetro, cujos resultados estão mostrados nas Tabelas V e VI.

Tabela V: Resultados utilizando o piranômetro. Fonte: Própria.

Experimentos usando o piranômetro - 03/05/2018, outdoor			
Irradiância ( $W/m^2$ )	Voc (V)	Isc (A)	Horário
709,45	21,64	0,93	14:12
249,19	19,77	0,14	16:41

Tabela VI: Resultados utilizando o solarímetro. Fonte: Própria.

Experimentos usando o solarímetro - 03/05/2018, outdoor			
Irradiância ( $W/m^2$ )	Voc (V)	Isc (A)	Horário
710	21,64	0,93	14:12
252	19,77	0,14	16:41

Isto mostrou que o sensor solar (piranômetro) está coerente com o esperado e compatível com o solarímetro quando sob o Sol.

Por fim, utilizando o simulador solar (caixa fechada), as quatro lâmpadas halógenas e somente o piranômetro ligado ao Arduino UNO, o qual fez a aquisição de dados, obtiveram-se os resultados que seguem na Tabela VII.

Tabela VII: Resultados utilizando o simulador solar.

Experimentos usando o piranômetro - 02/05/2018, caixa fechada			
Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Voc (V)	Isc (A)	Nº de lâmpadas
1052	21,8	1,21	4
571	19,8	0,65	2

Nota-se que os valores para a irradiância de 1052 W/m<sup>2</sup> são condizentes (próximos) aos valores da folha de dados do módulo fotovoltaico da Kyocera nas condições STC (irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, etc., sendo nominalmente Voc = 21,7 V e Isc = 1,26 A).

Também pode ser observado a proporcionalidade esperada na Isc quando a irradiância foi 571 W/m<sup>2</sup> (com somente duas lâmpadas ligadas), obtendo-se 0,65 A e, pouca variação em Voc.

#### IV. CONCLUSÕES

Obteve-se resultados inicialmente satisfatórios, pois os valores de Isc e Voc foram coerentes e próximos aos nominais do módulo usado (de 20 Wp) quando incidiu 1052 W/m<sup>2</sup>.

Outro ponto positivo é que os custos do simulador foram de R\$ 431,71 financiado pelas próprias autoras.

Foram explanados tópicos essenciais da teoria solar fotovoltaica, destacando-se: distribuição espectral da radiação; irradiância (W/m<sup>2</sup>); condições padrão de teste (STC); células e módulos fotovoltaicos; corrente de curto-circuito (Isc); tensão de circuito aberto (Voc). Esses itens e outros fundamentais poderão ser combinados, ajustados, medidos e/ou calculados, como variáveis práticas, em ensaios didáticos a serem elaborados na continuação deste projeto, a fim de enriquecer de forma prática os estudos de sistemas fotovoltaicos. Por exemplo, uma possibilidade futura é traçar a curva I-V de um módulo FV.

Para os próximos passos é importante ajustar o simulador solar atribuindo melhorias principalmente na caixa, substituir o modo de ligar os refletores não mais utilizando interruptores, mas sim realizando um controle suave da luminosidade das lâmpadas através de um *dimmer* ou um “varivolt” (controle da tensão de alimentação).

Por questões de segurança das pessoas e equipamentos, integridade e preservação da vida útil, é importante verificar e eliminar pontos quentes na caixa e nos refletores (feitos para ambientes externos segundo o fabricante). Por fim, será feita também a medição de temperatura do módulo FV enviando o sinal para o Arduino. Portanto, após o aperfeiçoamento do simulador solar, será dado o andamento à elaboração e execução de ensaios didáticos. Modelos de relatórios serão testados, montados e executados de forma a garantir o melhor resultado educacional, assegurando uma base de fundamentos e aprendizado aos alunos dos cursos de engenharias específicas afins a este tema.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. T. Pinho, A. M. Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, CEPTEL - DTE - CRESESEB, Edição Revisada e Atualizada, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] N. Petrin. *Radiação Solar*. Acedido em 20 de Maio de 2018, em: <https://www.estudopratico.com.br/radiacao-solar-insolacao-comprimento-de-onda-e-composicao-espectral/>.
- [3] R. Zilles, W. N. Macêdo, M. A. B. Galhardo, S. H. F. Oliveira. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*, Oficina de Textos, 2ª Edição, São Paulo, 2012.
- [4] UL 1703 - *Standard for Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels*, Underwriters Laboratories (UL), Edition Number: 3, Edition Date: 15/03/2002.
- [5] L. F. Souza, M. L. Carneiro, *Ensaio e Certificação de módulos solares*, Relatório de Iniciação Científica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2015.
- [6] M. B. Grillo, F. B. Cardoso, *Simulador de Radiação Solar - Resultados, Funcionamento e Testes em um Equipamento Construído*. Acedido em 03 de Maio de 2018 em: <http://abcm.org.br/anais/conem/2000/DC8738.pdf>.
- [7] G. M. Neves, *Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos*, Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.
- [8] P. J. Holoman, *Transferência de Calor*, McGraw-Hill, 1ª Edição, São Paulo, 1983.
- [9] W. M. Davidsom, *Tungsten-Halogen Incandescent Lamps*. Acedido em 20 de Maio de 2018 em: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>.
- [10] GE Iluminação, Lâmpadas Halógenas – Informações Gerais. Acedido em 20 de maio de 2018 em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/>.
- [11] Site Wikipédia (2016), Pyranometer. Acedido em 20 de Maio de 2018 em: <https://ipfs.io/ipfs/QmXoyvizjW3WknFiJnKLwHCnL72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/Pyranometer.html>. Site
- [12] F. A. S. Pereira, M. Â. S. Oliveira, *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica*, Publindústria, 1ª Edição, Porto, Portugal, 2011.