

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

GABRIEL JANTSCH

CONSTRUÇÃO DE UM SIMULADOR SOLAR PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Joinville

2022

GABRIEL JANTSCH

CONSTRUÇÃO DE UM SIMULADOR SOLAR PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Aeroespacial
do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Diego Alexandre Duarte

Joinville

2022

GABRIEL JANTSCH

CONSTRUÇÃO DE UM SIMULADOR SOLAR PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de julho de 2022 .

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Diego Alexandre Duarte
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Rafael Gallina Delatorre
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Thyago Santos Braga, Eng.
Avaliador
Embraer SA

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Tatiana e José Carlos, sou grato pelo esforço imensurável para me ajudar na realização de meus sonhos, a minha irmã, Joel, meus avós e minha madrinha pelo apoio constante. Agradeço também a Deus por cuidar de mim, me guiar e me tornar forte em minha caminhada.

Agradeço a orientação e todo o suporte prestado pelo meu orientador, professor Diego, sua disponibilidade e conhecimento foram decisivos nesse trabalho. Estendo também minha gratidão aos demais professores e professoras que contribuíram para minha formação.

Agradeço também ao CNPq pelos recursos destinados a este projeto sob número 307408/2021-3, que possibilitaram o desenvolvimento de um equipamento que contribuiu para minha formação e contribuirá continuamente nas pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Tratamentos de Superfície do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Sou grato pelas amizades que fiz durante a graduação e por ter a possibilidade de dividir com elas as conquistas e frustrações, assim como sou grato a todas as pessoas que cruzaram meu caminho e de alguma forma deixaram sua contribuição.

RESUMO

Com a demanda crescente por fontes renováveis de energia buscando minimizar os impactos ao meio ambiente, a geração de energia oriunda da luz solar vem ganhando espaço no mercado. Estima-se que até 2030, 5,8% da energia produzida no Brasil virá de fonte solar, atualmente, esta percentagem está em 1,7%. Com o aumento da demanda por sistemas que produzam energia fotovoltaica, há também maior necessidade por tecnologias que auxiliem no desenvolvimento de módulos fotovoltaicos mais eficientes, resistentes e baratos. Os simuladores solares são tecnologias caras que simulam a luz solar em ambiente controlado ajudando no desenvolvimento, testagem, comissionamento e caracterização de células solares, garantindo que sejam eficientes e resistentes. Devido a importância dos simuladores e também seu custo, tornando-o restrito a alguns nichos, este trabalho apresenta a proposta de projeto e construção de um simulador solar de baixo custo. Após análises de tecnologias já existentes e o entendimento das características da luz solar e operação de módulos fotovoltaicos, foi dimensionado um simulador fotovoltaico de acordo com um dimensionamento pré-estabelecido para instalação em laboratório, assim como foi definida a quantidade de lâmpadas necessárias para simular a luz solar e materiais e componentes para sua construção. Finalizada a montagem do simulador de acordo com o projeto, foi aferida a irradiância na área de testes, uma estimativa da resposta espectral e estabilidade temporal para sua classificação baseada na Norma NBR 11879 da ABNT 1991, e então foi analisada a tensão e corrente fotogerada sob espectro AM1,5G para uma célula solar padrão. Ao final das validações, o simulador solar foi classificado como um simulador Classe C, além de entregar um baixo custo de produção, que no final do projeto chegou em R\$3390.

Palavras-chave: Simulador Solar. Energia Solar. Células Solares.

ABSTRACT

With the growing demand for renewable energy sources seeking to minimize impacts on the environment, the generation of energy from sunlight has been gaining ground in the market. It is estimated that by 2030, 5.8% of the energy produced in Brazil will come from solar sources, currently, this percentage is at 1.7%. With the demand increase for photovoltaic energy systems, there is also a greater need for technologies that help in the development of more efficient, resistant and cheaper photovoltaic modules. Solar simulators are expensive technologies that simulate sunlight in a controlled environment helping in the development, testing, commissioning and characterization of solar cells, ensuring they are efficient and resilient. Due to the importance of simulators and also their cost, making it restricted to some niches, this work presents a proposal for the design and construction of a low-cost solar simulator. After analyzing existing technologies and understanding the characteristics of sunlight and the operation of photovoltaic modules, a photovoltaic simulator was designed according to a pre-established design for installation in the laboratory, as well as the number of lamps needed to simulate the sunlight and materials and components for its construction. After completing the assembly of the simulator according to the project, the irradiance in the test area was measured, an estimate of the spectral response and temporal stability for its classification based on the NBR 11879 of ABNT 1991, and then the voltage and photogenerated current were analyzed under AM1.5G spectrum for a standard solar cell. At the end of the validations, the solar simulator was classified as a Class C simulator, in addition to delivering a low production cost, which at the end of the project reached R\$3390.00.

Keywords: Solar Simulator. Solar Energy. Solar Cells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Irradiância espectral do Sol fora da atmosfera e ao nível do mar em comparação com o espectro de um corpo negro em 5900 K (temperatura da superfície do Sol).....	15
Figura 2 - Resposta espectral dos tipos mais comuns de células solares e intensidade da irradiância solar do espectro AM1.5 em função do comprimento de onda.....	16
Figura 3 - Estrutura de uma célula solar de silício. Os contatos de alumínio auxiliam a condução de eletricidade em painéis e a camada anti-reflexida é utilizada para reduzir o espalhamento da luz na superfície da célula e melhor aproveitamento da radiação incidida.....	17
Figura 4 - Produção de corrente elétrica em uma célula solar de junção PN. Os pontos verdes na figura representam os elétrons e os pontos vermelhos os buracos positivos.....	18
Figura 5 - Exemplos de degradação às quais um painel solar está submetido.....	19
Figura 6 - Simulador solar presente no Instituto de Pesquisas Tecnológicas.....	20
Figura 7 - Relação entre o índice local e o índice médio.....	25
Figura 8 - Tabela de relação para coeficientes de utilização. O índice médio k é representado na tabela pelo fator de área K . A primeira linha da tabela com 80, 70, 50, 30 e 0 representa a refletância (%) do teto do ambiente de irradiação. A segunda linha com 50, 30, 10 e 0 representa a refletância das paredes e a terceira linha a refletância do piso do ambiente iluminado.....	25
Figura 9 - Espectro da lâmpada HPI-T plus de 400 W da marca Philips.....	26
Figura 10 - Curva de irradiância em função da distância para a lâmpada Philips HPI-T Plus de 400W com e sem refletor.....	27
Figura 11 - Vistas com cotas do projeto. A imagem da direita representa a vista frontal e a da esquerda a vista superior.....	28
Figura 12 - Vista (a) frontal, (b) lateral e (c) superior do simulador.....	29
Figura 13 - Perspectiva explicativa do projeto do simulador.....	29
Figura 14 - Construção da estrutura interna do simulador solar.....	30
Figura 15 - Enclausuramento do simulador solar. Na imagem a direita nota-se os refletores com as respectivas lâmpadas encaixadas nos bocais e na imagem a esquerda tem-se uma visão generalizada da área de trabalho interna.....	31
Figura 16 - Perspectiva do simulador finalizado.....	31

Figura 17 - Estabilidade do simulador ao longo do tempo.....	33
Figura 18 - Mapa de irradiância na área de testagem.....	34
Figura 19 - Célula solar padrão de silício cristalino.....	35
Figura 20 - Validação do simulador para medir a tensão e corrente gerada pela célula solar padrão.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de um simulador solar de acordo com a NBR 11879 da ABNT.	21
Tabela 2 - Especificações técnicas da lâmpada de vapor metálico HPI-T de 1000 W.	23
Tabela 3 - Materiais utilizados na construção do simulador e preços.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM – Coeficiente de Massa
ASTM - American Society for Testing and Materials
CEPA - Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada
C-Si – Silício Cristalino
COP26 - Climate Change Conference
CTJ – Centro de Tecnológico de Joinville
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
IEA – International Energy Agency
IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica
PS – Pulsed Simulator
SS – Steady State
U.A – Unidade de Área
UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. LUZ SOLAR	14
2.2. CÉLULAS SOLARES	16
2.3. SIMULADOR SOLAR	18
3. METODOLOGIA	22
3.1 PREMISSAS DO PROJETO	22
3.2 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE LÂMPADAS	23
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LÂMPADAS E REFLETORES	25
3.4 ESTRUTURA DO SIMULADOR SOLAR	27
3.4.1 Projeto do simulador solar	27
3.4.2 Construção do simulador solar	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5. CONCLUSÃO	38
APÊNDICE A – DATASHEET LÂMPADA DE VAPOR METÁLICO PHILIPS HPI-T 1000W.	43

1. INTRODUÇÃO

O avanço da sociedade através do surgimento de novas tecnologias e mudanças de hábito tem deixado o ser humano cada vez mais dependente da energia elétrica, pois, desde 1978, a demanda por energia cresceu mais rápido do que o aumento da população global (KOBBER, 2020). Em 2020, o consumo de energia primária (oriunda de fontes da natureza, como petróleo, gás, carvão, luz solar, ventos e água) no mundo, atingiu $556,63 \times 10^{18}$ J; no Brasil, o consumo foi cerca de $12,01 \times 10^{18}$ J (STATISTICAL REVIEW OF WORLD, 2021).

Em razão da pandemia da Covid-19, o consumo de energia no mundo sofreu queda de 4,5% em 2020 comparado com 2019 devido às medidas restritivas de mobilidade, que ocasionaram a diminuição da atividade nos setores comerciais e industriais. Na Alemanha, onde as restrições foram mais rigorosas, o consumo caiu 7,5% e no Brasil, cerca de 3,6% (CARVALHO et al., 2020).

Mesmo em situações atípicas como a pandemia da Covid-19, é estimado que o consumo total de energia no mundo cresça cerca 40% até 2060. Consumo que virá com mudanças no perfil das matrizes de geração de energia devido, principalmente, a políticas ambientais, avanço de tecnologias para produção de energia e equipamentos com perfil de consumo otimizado (KOBBER, 2020)

As novas metas ambientais aliadas a características socioeconômicas e, principalmente, geográficas de cada país, influenciarão a redistribuição das matrizes energéticas. Em 2020, as emissões diretas e indiretas de CO₂ superaram 14 Gt (Gigatoneladas) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA, 2021). Na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2021 (COP26) foi definida uma meta para redução dessas emissões em 45% até 2030, assim como medidas de suficiência com políticas de incentivo voltadas para utilização de fontes renováveis de energia (SAHEB, 2021).

A energia renovável representa apenas 1,5% da geração de energia global. No Brasil, 42,9% da energia é gerada por fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018), sendo 65,2% de usinas hidroelétricas, 8,2% com biomassa, 10,9% com energia eólica 10,9% e 1,7% com energia solar. Representando a maior parte da geração, a energia provinda de usinas hidroelétricas tem levantado discussões que contestam sua real característica renovável, uma vez que para se obtê-la, cursos inteiros de água são deslocados e represados, atingindo

o ecossistema, além de impactos econômicos e sociais para os habitantes locais (BECKER, 2012).

Tais discussões têm desacelerado o avanço das construções de matrizes de geração de energia hidrelétrica, dando espaço para outras fontes, que impactem menos o ambiente e levem menos tempo para sua implementação. No Brasil, de todas as fontes renováveis, a solar apresenta maior potencial de crescimento. Desde 2014, o Governo passou a inserir a fonte solar em leilões de energia para fins de abastecimento do mercado regulado, sendo estimado que em 2030 a fonte corresponderá a 5,8% da geração de energia elétrica no país (KRELL; SOUZA, 2020).

O aumento da geração de energia solar acarretará na viabilização comercial de painéis solares. Com as demandas aumentadas, haverá maior necessidade por painéis mais resistentes e eficientes e com isso haverá maior produção de pesquisas e estudos voltados para o campo da energia solar (TOMALSQUIM et al., 2007).

A partir dessa premissa, este trabalho propõe o desenvolvimento de um simulador solar para teste e validação de células solares em laboratório. A proposta deste projeto é viabilizar a construção de um modelo de baixo custo do equipamento similar aos modelos comercializados, em escala menor e com capacidades operacionais que consigam simular a luz do sol para os testes nas células solares.

A metodologia pressupõe a definição das condições de luminância do sol para projetar um simulador fechado com lâmpadas que possam simular a luz solar. Obtidas as definições técnicas e dimensionamento, o simulador será construído, tendo sua capacidade operacional testada em comparação com as condições reais da iluminação solar e, para isso, serão analisados os espectros e comprimentos de onda da luz das lâmpadas através de testes no laboratório da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC).

Com o simulador validado, será analisada sua efetividade em testes sobre células solares, para coletar parâmetros reais práticos e com isso estudar o desempenho e características de células solares em exposição simulada similar ao ambiente externo com luz solar.

1.1. OBJETIVOS

Nos itens abaixo são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho desenvolvido que trata do projeto e construção de um simulador solar.

1.1.1. Objetivo Geral

Projetar e desenvolver um simulador solar de baixo custo para teste e validação de células solares fotovoltaicas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Projetar um simulador solar por meio de cálculos e desenhos obtidos via CAD;
- Realizar orçamentos e comprar os materiais necessários;
- Construir o equipamento com base no projeto desenvolvido;
- Caracterizar a radiação produzida pelo simulador solar com base nas normas técnicas vigentes
- Avaliar as propriedades elétricas de uma célula solar fotovoltaica padrão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando o objetivo de desenvolver um simulador solar de baixo custo que seja capaz de reproduzir, em condições de laboratório, as características da radiação solar para testar, aferir a eficiência e validar células solares, bem como entender as particularidades do processo de simulação, este capítulo apresenta algumas informações sobre radiação solar, módulos fotovoltaicos e simuladores solares a fim de demonstrar os conhecimentos básicos para o desenvolvimento do trabalho proposto.

2.1. LUZ SOLAR

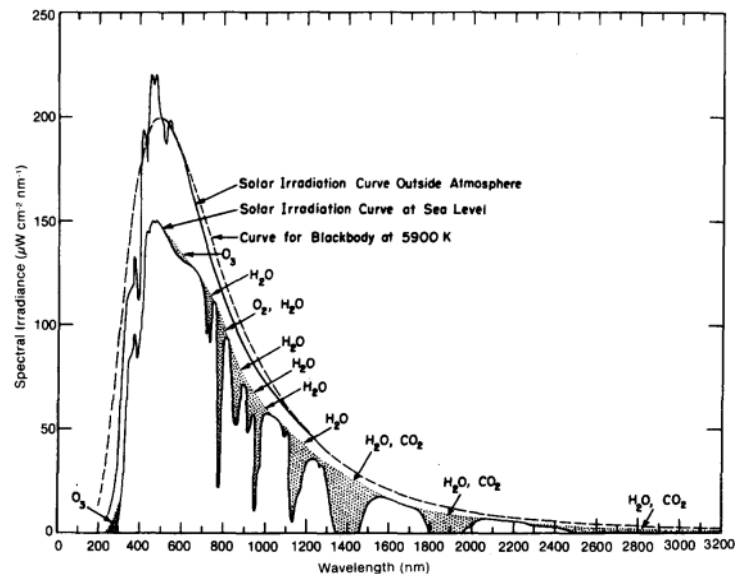
A luz solar parte do Sol em uma viagem de aproximadamente 150 milhões de quilômetros até chegar na Terra. As medidas mostram que a Terra recebe do Sol em sua superfície, uma densidade de potência (irradiância) de 1000 W/m^2 (STENSMANN, 2022). Com isso, a quantidade de energia que o Sol fornece todos os dias à Terra é suficiente para alimentar toda demanda energética diária do planeta.

Sendo o Sol o responsável pela existência das células fotovoltaicas, é fundamental compreender o comportamento da distribuição espectral da radiação solar, pois sua intensidade varia de acordo com o local, hora e dia do ano. Para base de estudos, o espectro solar é obtido e padronizado através de simulações, uma vez que possui certas alterações dependendo de condições geográficas, climáticas, e de tempo (MATSON et al., 1983).

A Figura 1 apresenta a irradiância monocromática (irradiância por unidade de comprimento de onda) em função do comprimento de onda da radiação solar produzida fora da atmosfera terrestre e ao nível do mar em comparação com o espectro produzido por um corpo negro em 5900 K. O espectro solar apresentado possui radiação com comprimentos de onda que variam entre 200 e 3200 nm. Essa região espectral contempla as regiões do espectro ultravioleta (200 e 400 nm), visível (400 e 700 nm) e infravermelho próximo (700 e 3200 nm). Os dados mostram que o espectro solar, antes da radiação atingir a atmosfera terrestre, tem o comportamento do espectro de um corpo negro, indicando que o Sol se comporta como um emissor ideal. Ao cruzar a atmosfera da Terra, a radiação é atenuada devido à absorção promovida, na grande maioria, por vapor de água, ozônio, oxigênio e dióxido de

carbono, que absorvem comprimentos na faixa de 300 até 4000 nm (MATSON et al., 1983).

Figura 1 - Irradiância espectral do Sol fora da atmosfera e ao nível do mar em comparação com o espectro de um corpo negro em 5900 K (temperatura da superfície do Sol).



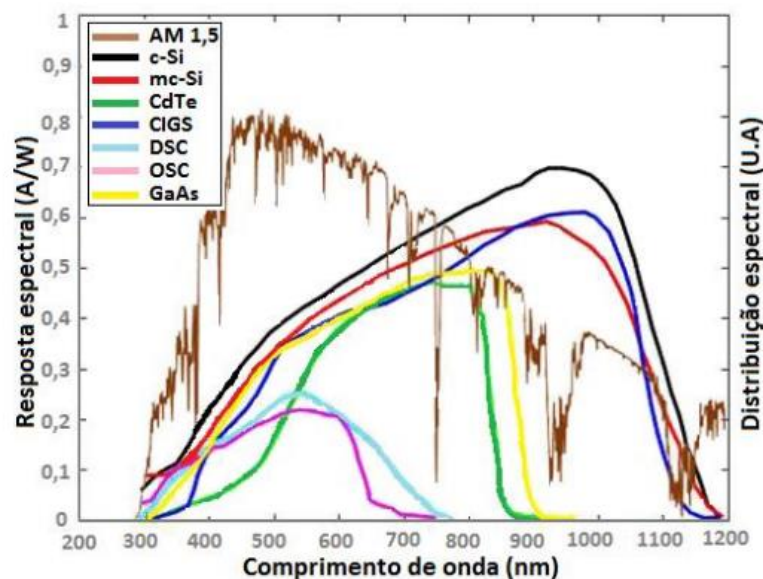
Fonte: Matson et al. (1983, p. 109).

A irradiância do espectro solar depende da espessura da camada atmosférica que percorre, de características geográficas locais, inclinação da Terra e outros fatores. Portanto, adota-se o espectro padrão (AM1.5) representativo para o maior número possível de aplicações fotovoltaicas (THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006). O espectro padrão não é derivado de um espectro particular; é calculado a partir do espectro de referência AM0 (espectro medido antes radiação atingir a superfície da atmosfera terrestre) sob condições geométricas e atmosféricas representativas (GUEYMARD, 2002) quando o Sol está em um ângulo zenital de $48,2^\circ$. No espectro padrão AM1.5, representa o coeficiente de massa de ar e 1,5 a espessura de 1,5 atmosfera, onde AM pode ser calculado pela razão L/L_0 , em que L é o comprimento do caminho que a radiação viaja e L_0 o comprimento do caminho no zênite (normal à superfície da Terra) ao nível do mar (KASTEN; YOUNG, 1989).

A Figura 2 apresenta o espectro padrão AM1.5 e a resposta espectral de alguns tipos de células solares fotovoltaicas (COSTA, 2018). A resposta espectral

representa a intensidade da corrente produzida por unidade de potência incidida sobre a célula, em função do comprimento de onda da radiação. As células solares de silício mono (mc-Si) e policristalino (c-Si) o pico da resposta espectral na região do infravermelho, mesma região das células CIGS (cobre-índio-gálio-selênio). Na região de transição do visível para infravermelho próximo estão as células solares de filmes finos, como GaAs (arseneto de gálio) e CdTe (telureto de cádmio). Na região do espectro onde existe o pico de irradiância solar (em torno de 500 nm) está o máximo de resposta espectral para as células solares de terceira geração, como a DSSC (dye-sensitized solar cell) e a OSC (organic solar cell).

Figura 2 - Resposta espectral dos tipos mais comuns de células solares e intensidade da irradiância solar do espectro AM1.5 em função do comprimento de onda.



Fonte: adaptado de Sandia National Laboratories (2017).

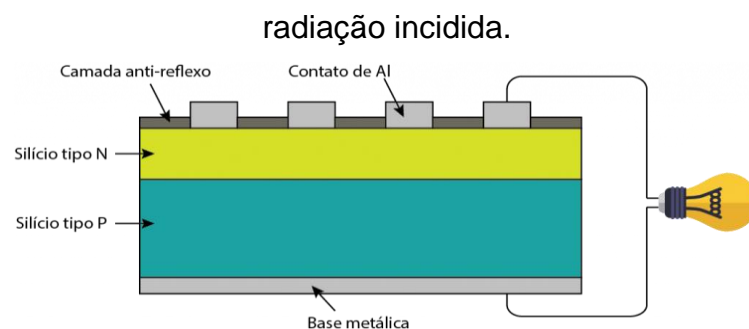
2.2. CÉLULAS SOLARES

Em 1839 surgiu a primeira menção ao efeito fotovoltaico, quando Edmond Becquerel, um físico francês, observou que duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à radiação solar. Nas décadas seguintes, ainda de forma tímida, o efeito fotovoltaico foi sendo estudado e novas tecnologias para produção de eletricidade através da luz solar foram produzidas, até que em 1954 a primeira célula solar preparada a base de silício foi

desenvolvida por cientistas da Bell Labs, se tornando mais viável comercialmente e tendo sua aplicação cada vez mais difundida (BRITO; SILVA, 2006).

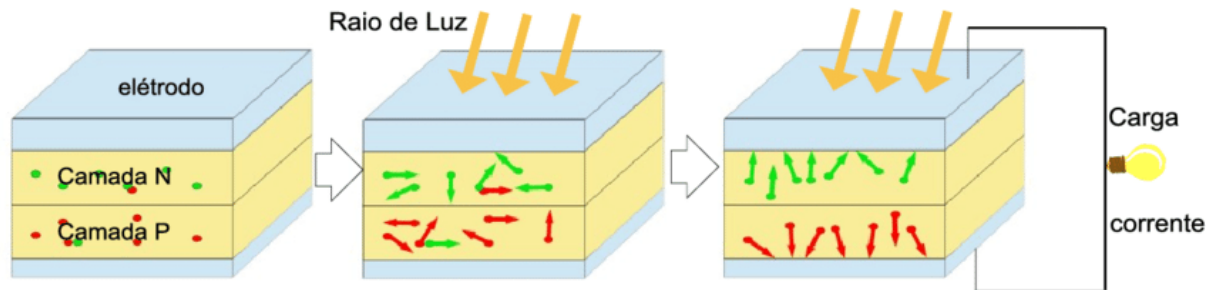
Atualmente, a grande maioria das células fotovoltaicas encontradas no mercado são de silício, as quais podem ser de silício cristalino (policristalino ou monocristalino) ou silício amorfo. Para a fabricação de uma célula solar, obtém-se o silício em sua forma pura, porém, o cristal de silício puro não possui elétrons livres, sendo um mal condutor elétrico (MACHADO; MIRANDA, 2015). Para resolver esse problema, é realizada dopagem do silício, onde se acrescentam porcentagens de outros elementos para proporcionar um material com portadores de carga negativa (elétrons) ou positivas (buracos). Para produzir o silício com excesso de cargas negativas, pode ser adicionado o fósforo na estrutura cristalina do material, o que dá origem ao silício do tipo N. Para produzir o silício com excesso de cargas positivas, pode ser adicionado o boro, formando o silício do tipo P (AMALFI, 2005). A união desses dois materiais forma a chamada junção PN, que permite construir uma célula solar fotovoltaica de silício, conforme ilustrado na Figura 3. A diferença de potencial produzida pelo excesso de cargas elétricas nos dois materiais produz um campo elétrico interno que acelera os elétrons fotoexcitados pela radiação solar (efeito fotovoltaico). Os elétrons do silício tipo N são acelerados pelo campo elétrico interno para o circuito externo (carga externa que será alimentada) e retornam para a célula solar, por meio do silício tipo P, para realização de um novo processo de fotoexcitação, conforme ilustrado na Figura 4 (NASCIMENTO, 2004). A intensidade dessa corrente varia com a intensidade de luz solar que incide sobre a célula e o fluxo de elétrons se manterá enquanto houver essa incidência.

Figura 3 - Estrutura de uma célula solar de silício. Os contatos de alumínio auxiliam a condução de eletricidade em painéis e a camada anti-reflexida é utilizada para reduzir o espalhamento da luz na superfície da célula e melhor aproveitamento da



Fonte: Shareenergy (2017).

Figura 4 - Produção de corrente elétrica em uma célula solar de junção PN. Os pontos verdes na figura representam os elétrons e os pontos vermelhos os buracos positivos.



Fonte: adaptado de Quaschnig (2004).

Além das células solares de silício cristalino, que são rígidas, existem as células de silício amorfo delgado estruturadas como filmes finos, que são produzidas sobre substratos de baixo custo como plásticos, vidro, metais, aço, entre outros. Com isso, há redução nos custos de produção, são esteticamente agradáveis e possuem propriedades flexíveis; porém, não atingem eficiências de conversão como as células convencionais (BRITO; SILVA, 2006). Essas células são utilizadas em relógios, calculadoras, equipamentos para iluminação externa como em jardins etc.; *i.e.*, onde não há necessidade de alta eficiência em geração de energia através da luz solar, garantindo uma adequada eficiência até mesmo sob iluminação artificial (NASCIMENTO, 2004). As células solares obtidas a partir de filmes finos são conhecidas como células de 2ª geração, o que também inclui as células CIGS, GaAs e CdTe. As células de silício tradicionais são classificadas como 1ª geração.

Ainda em fase de pesquisa, também pode-se citar as células sensibilizadas por corante (DSSC) que se baseiam na utilização de um corante capaz de transferir um elétron no estado excitado para um óxido semiconductor, iniciando o processo que leva à geração de corrente (MACHADO; MIRANDA, 2015). Esse tipo de dispositivo, junto com as células solares orgânicas (OSC), estão classificadas como células solares de 3ª geração.

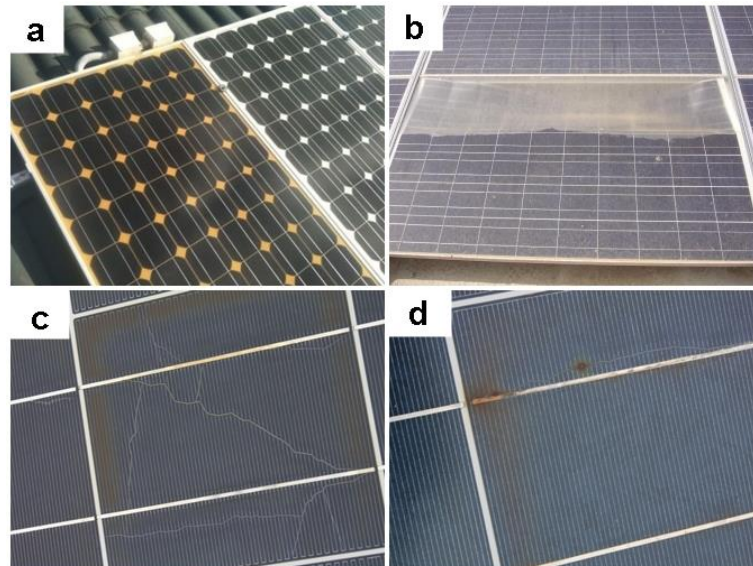
2.3. SIMULADOR SOLAR

Cada vez mais acessíveis economicamente e sendo popularizados por demandas ecológicas, os sistemas de geração de energia solar movimentam

demandas cada vez maiores por pesquisas e tecnologias integradas para produção de células solares mais duráveis e eficientes (TOMALSQUIM et al., 2007).

A maior parte dos módulos fotovoltaicos apresenta certa degradação de desempenho elétrico depois de instalados e expostos à iluminação solar. Portanto, antes de caracterizá-los é importante adotar procedimentos para sua estabilização (COSTA, 2018). Alguns tipos de degradação que afetam o desempenho de células solares são amarelamento, escurecimento, delaminação, bolhas, microfissuras e pontos quentes (CASSINI et al., 2020). Na Figura 5 são apresentadas algumas imagens de tipos de degradação que um painel pode sofrer quando exposto ao sol.

Figura 5 - Exemplos de degradação às quais um painel solar está submetido.



Fonte: Energês (2020).

Na Figura 5, o item a) mostra o amarelamento, que é a degradação do material encapsulante (tipicamente o EVA) do módulo fotovoltaico, devido principalmente a altas temperaturas, conferindo um aspecto amarelado ou marrom para o material. Essa condição reduz corrente na célula solar. O item b) apresenta um exemplo de delaminação que ocorre quando a umidade penetra nos componentes elétricos internos, o que causa uma falha catastrófica, exigindo a substituição do módulo fotovoltaico. O item c) representa o surgimento de microfissuras e trincas no painel que acontecem por condições severas de exposição e principalmente o uso de materiais de segunda mão em sua montagem. Por fim o item d) mostra pontos quentes causados por manuseio incorreto dos painéis, falhas durante a fabricação e incompatibilidade de células de diferentes correntes quando conectadas em série.

De forma a estudar a degradação e adotar procedimentos para estabilização de módulos fotovoltaicos, assim como validar seu desempenho em exposição à luz solar, são usados simuladores solares nos quais os módulos são inseridos para serem estudados em ambiente controlado antes de serem instalados ou aprovados comercialmente.

Os simuladores solares, através de fontes artificiais, como lâmpadas, emitem e simulam radiação semelhante à emitida pelo Sol e, com isso, eliminam a dependência de fatores naturais, possibilitando maior economia e eficiência ao testar células solares e viabilizar novas linhas de pesquisa (RODRIGUES, 2016).

Utilizando um simulador solar, realizam-se ensaios com a intenção de caracterizar a irradiância na superfície de ensaio e medir a curva corrente-tensão de um módulo fotovoltaico sob diferentes condições (PEREIRA, 2017). Para exemplificação, a Figura 6 mostra o simulador solar do Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento, ligado ao Centro Tecnológico do Ambiente Construído do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que com uma potência de potência de 50 kVA (Quilovoltampere) mede a eficiência de coletores solares em sistemas de aquecimento de água e realiza ensaios em sistemas fotovoltaicos (IPT, 2012).

Figura 6 - Simulador solar presente no Instituto de Pesquisas Tecnológicas.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2012).

No mercado existem dois tipos de simuladores solares disponíveis com diferentes configurações e aspectos técnicos para diversas finalidades. O primeiro é o sistema *Steady State* (SS) e o segundo é o sistema *Pulsed Simulator* (PS). As principais diferenças entre ambos são a vida útil da lâmpada, percentual de irradiância

e comprimento de onda. Portanto, o uso de cada um dependerá das exigências de cada aplicação em laboratório (CHAWLA, 2018).

No Brasil, a Norma NBR 11879 da ABNT (1991) estabelece requisitos de desempenho para os simuladores solares. A Tabela 1 mostra as exigências necessárias para classificação de um simulador solar. A norma avalia três quesitos: (i) uniformidade de radiação, (ii) estabilidade temporal e (iii) casamento espectral. O primeiro item considera que uniformidade da radiação proveniente do Sol é a situação ideal, devido à distância Terra-Sol, que garante aproximadamente o mesmo valor de irradiância para uma ampla área de exposição. O segundo item considera a estabilidade da irradiância por um período relativamente longo. Para o Sol, esse intervalo corresponde a alguns minutos, com o Sol posicionado em um ângulo zenital qualquer. O terceiro item refere-se ao casamento do espectro AM1.5 com o espectro da(s) lâmpada(s) utilizada(s) no simulador.

Tabela 1 - Classificação de um simulador solar de acordo com a NBR 11879 da ABNT.

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

Fonte: ABNT (1991, p. 1-3).

3. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado os materiais e métodos utilizados para produção do simulador. Antes da produção do equipamento em laboratório, foram realizados cálculos de projeto, definição das dimensões e geometria em CAD e realização de orçamentos para compra dos materiais necessários.

3.1 PREMISSAS DO PROJETO

Como premissa fundamental do projeto, o simulador solar deverá ser capaz de simular a luz do sol em condições Padrão de Teste (STC), que corresponde à uma fonte luminosa com irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura do dispositivo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (KENNY et al., 2013). E, como definição, foi adotado que o volume interno útil do simulador de $0,0625 \text{ m}^3$, equivalente a um cubo com largura (L) de 50 cm, comprimento (C) de 50 cm e altura (H) de 25 cm (altura entre a mesa de teste e o bulbo das lâmpadas). Essas medidas foram definidas considerando o espaço do laboratório onde o simulador será instalado e uma área útil adequada para exposição das células solares em teste.

Para este projeto serão selecionadas lâmpadas de vapor metálico (Apêndice A), que são comumente usadas em simuladores solares, devido ao seu baixo consumo de energia, tempo de vida prolongado (> 1000 horas), alta eficiência de iluminação de mais de 90 lm/W , bom equilíbrio em qualidades espectrais e correspondência muito próxima da radiação solar (BEENSON et al., 1978). Porém, a desvantagem principal desse tipo de lâmpada segundo Matson et al. (1984) é a baixa qualidade de colimação, não sendo ideal para simuladores solares de alta concentração e simulador solar para testes I-V padrão, mas, são indicadas em aplicações que permitem a luz não colimada, como simuladores de teste de módulo e alguns simuladores de testes fotovoltaicos que só precisam de iluminação constante de área grande e características espectrais menos exatas. O modelo de lâmpada de vapor metálico escolhido foi o HPI-T com potência de 1000 W da fabricante Philips, com suas especificações técnicas descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações técnicas da lâmpada de vapor metálico HPI-T de 1000 W.

Potência	Fluxo Luminoso	Eficiência luminosa	Temperatura da cor	Vida útil
1000 W	82100 lm	82,1 lm/W	4300 K (branco)	20000 h

Fonte: Guia Prático Philips Iluminação (2022).

Nos cálculos de projeto serão utilizadas duas unidades ópticas: lux e lúmens. O lux é a unidade de iluminação do Sistema Internacional de Unidades, equivalente à produção de um fluxo luminoso uniformemente distribuído sobre uma superfície com 1 lúmen/m², onde o lúmen é a unidade de fluxo luminoso do SI definida como fluxo luminoso produzido por uma fonte puntiforme com intensidade uniforme de uma candela (potência luminosa por unidade de ângulo sólido emitida por uma fonte de luz pontual em uma determinada direção), contida num sólido de um esferorradiano (OXFORD LANGUAGES, 2022).

3.2 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE LÂMPADAS

A quantidade de lâmpadas será definida por meio do método dos lúmens utilizando a Equação 1 (PROCEL, 2011):

$$n = \frac{\Phi}{\phi} = \frac{ES}{\phi \eta_L \mu d} \quad (1)$$

em que n representa a quantidade de lâmpadas, Φ o fluxo luminoso total do simulador (em lúmens), ϕ o fluxo luminoso de cada lâmpada (em lúmens), S a área de iluminação (em m²), E a irradiância (em lux), μ o coeficiente de utilização do equipamento (adimensional) que descreve a qualidade reflexiva das paredes do ambiente, d o fator de depreciação (adimensional) que é definido a partir da quantidade de horas de utilização do equipamento sem manutenção e η_L é a eficiência da lâmpada definida pelo fabricante. Para calcular o número de lâmpadas, é necessário determinar o coeficiente de utilização, que está relacionado com o valor do índice médio k, que é um fator que depende das propriedades geométricas do simulador (comprimento C, largura L e altura H), conforme descrito pela equação 2 (PROCEL, 2011):

$$k = \frac{CL}{(C+L)H} = \frac{0,5 \cdot 0,5}{(0,5+0,5) \cdot 0,55} = 0,45 \quad (2)$$

A equação (2) considera que a fonte luminosa é equidistante a todos os pontos da superfície irradiada. Na prática, a distância entre a lâmpada e a superfície varia conforme o ponto analisado da superfície. Para este caso, considerando a área projetada do simulador, as distâncias entre a lâmpada e a superfície variam de 25 cm até 55 cm.

O valor calculado para o índice médio permite determinar o “índice local” definido na tabela da Figura 7. O índice médio calculado com a equação 2 indica um índice local J. Com isso, o coeficiente de utilização μ é obtido por meio da tabela apresentada na Figura 8, que relaciona o índice local com o tipo de luminária utilizada como refletor das lâmpadas. Entre as opções apresentadas, o tipo de luminária que mais se aproxima da aplicação estudada neste trabalho é o tipo 2, que trata de um refletor industrial para lâmpadas de vapor. Nas opções do refletor do tipo 2 e para um índice local J foi estabelecido um coeficiente de utilização $\mu = 0,36$ que considera a reflexão do teto em 80%, a reflexão das paredes em 50% e a área de irradiação, onde se coloca a célula solar, em 10% ambos para um caso de refletância próxima do ideal ao utilizar o alumínio como material para o enclausuramento. O baixo percentual para a reflexão do piso é devido a presença da célula solar. O fator de depreciação utilizado é $d = 0,80$ (conforme dados do fabricante para um valor médio de 5000 horas de uso) e a eficiência da lâmpada é $n_L = 83\%$ (também fornecido pelo fabricante). Considerando que a área de iluminação é $S = 0,5 \times 0,5 = 0,25 \text{ m}^2$, a irradiância solar para um dia claro de $E = 130.000 \text{ lúmens/m}^2$, conforme medições realizadas em Birmingham, no Alabama (LANCA, 2019) e $\phi = 82100 \text{ lúmens}$ (fornecido pelo fabricante), o número de lâmpadas necessárias obtido pela equação (1) é $n = 1,65 = 2$ lâmpadas.

Figura 7 - Relação entre o índice local e o índice médio.

Índice do Local / Índice Médio		
Índice do Local	Índice Médio	Limites
A	6,0	4,5 ou mais
B	4,0	3,5 a 4,5
C	3,0	2,75 a 3,5
D	2,5	2,25 a 2,75
E	2,0	1,75 a 2,25
F	1,5	1,35 a 1,75
G	1,25	1,12 a 1,38
H	1,0	0,9 a 1,12
I	0,8	0,7 a 0,9
J	0,6	Menos que 0,7

Fonte: Mundo da Elétrica (2022).

Figura 8 - Tabela de relação para coeficientes de utilização. O índice médio k é representado na tabela pelo fator de área K. A primeira linha da tabela com 80, 70, 50, 30 e 0 representa a refletância (%) do teto do ambiente de irradiação. A segunda linha com 50, 30, 10 e 0 representa a refletância das paredes e a terceira linha a refletância do piso do ambiente iluminado.

Fator de Área K	80			70			50		30		0
	50	50	30	50	50	30	30	10	30	10	0
	30	10	10	30	10	30	10	10	10	10	0
0.60	.38	.36	.30	.37	.36	.31	.29	.25	.29	.25	.24
0.80	.47	.44	.37	.46	.43	.38	.37	.32	.36	.32	.30
1.00	.54	.50	.44	.53	.49	.45	.43	.38	.42	.38	.36
1.25	.61	.56	.50	.59	.55	.52	.48	.44	.48	.44	.42
1.50	.66	.60	.54	.65	.59	.58	.53	.49	.52	.49	.47
2.00	.74	.66	.62	.72	.65	.66	.60	.56	.59	.56	.54
2.50	.80	.70	.66	.78	.70	.72	.64	.61	.63	.60	.58
3.00	.84	.73	.70	.81	.72	.76	.68	.65	.66	.64	.62
4.00	.89	.77	.74	.86	.76	.82	.72	.69	.70	.68	.66
5.00	.92	.79	.76	.89	.78	.85	.74	.72	.73	.71	.69

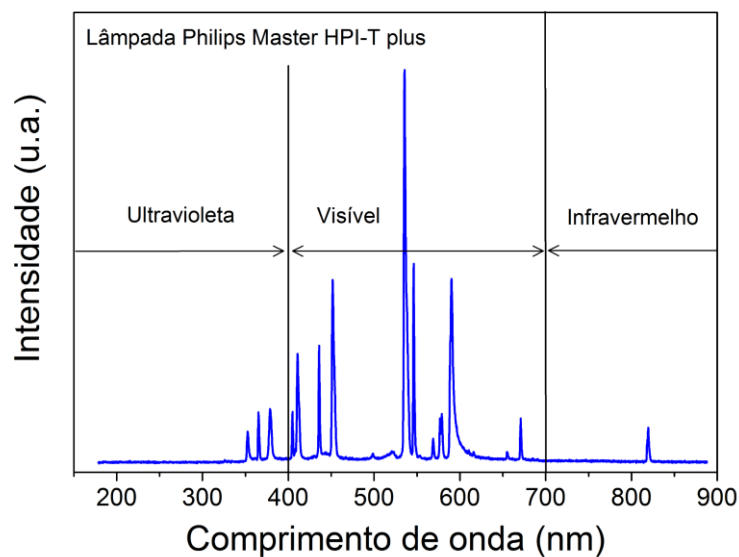
Fonte: PHILIPS - Noções básicas de iluminação (2010).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LÂMPADAS E REFLETORES

Buscando identificar se o espectro de luz emitido pela lâmpada se aproxima do espectro da luz solar, assim como entender o comportamento da irradiância da lâmpada para validar sua usabilidade no projeto, foi utilizado uma lâmpada Philips HPI-T Plus de 400W existente no laboratório como referência, onde, através de

medições realizadas com um espectrômetro óptico UV-VIS OCEAN OPTICS USB 4000 com resolução de 1,5 nm, obteve-se o espectro de emissão da lâmpada, como mostrado Figura 9, indicando a presença de radiação ultravioleta (350 até 400 nm), visível (400 até 700 nm) e infravermelha (acima de 700 nm - um pico em torno de 825 nm), validando sua similaridade com o espectro solar. Como a lâmpada de HPI-T de 1000 W é de mesmo modelo da lâmpada HPI-T de 400W, diferindo apenas a potência, assume-se o mesmo espectro de emissão.

Figura 9 - Espectro da lâmpada HPI-T plus de 400 W da marca Philips.

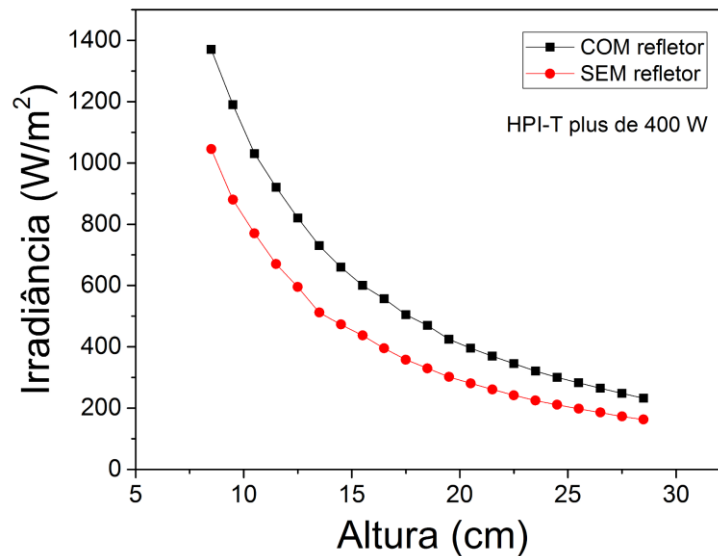


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a mesma lâmpada foram realizados testes de intensidade de radiação emitida com e sem o auxílio de refletores, com o objetivo de avaliar a eventual utilização de refletores no simulador. As medições de irradiância foram realizadas com um radiômetro Fluke FLK-IRR1-SOL, que permite medir irradiação solar de até 1400 W/m², posicionado em distâncias entre 8,5 e 28,5 cm do bulbo da lâmpada. Os dados são apresentados na Figura 10. O refletor utilizado foi montado com uma chapa curva de alumínio polido, sem preocupações com um dimensionamento ideal (posteriormente, para construção do equipamento, foram comprados refletores indicados para o modelo da lâmpada utilizada). Na posição de 8,5 cm sem o refletor, o sensor apresentou uma irradiância de aproximadamente 1040 W/m², enquanto com a medida realizada com o refletor, o sensor apresentou 1370 W/m², indicando um fator de proporção igual a 1,32. Fazendo a mesma análise para todos os pontos, gera-se

um fator médio de $1,40 \pm 0,04$, indicando que o refletor pode aumentar a irradiação sobre um ponto em torno 40% quando comparado com a situação sem refletor.

Figura 10 - Curva de irradância em função da distância para a lâmpada Philips HPI-T Plus de 400 W com e sem refletor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 ESTRUTURA DO SIMULADOR SOLAR

Nas seções seguintes será apresentado o projeto do simulador solar, de acordo com as premissas definidas e dimensionamento do número de lâmpadas calculado anteriormente, assim como os materiais a serem utilizados para sua montagem e, por fim, sua construção.

3.4.1 Projeto do simulador solar

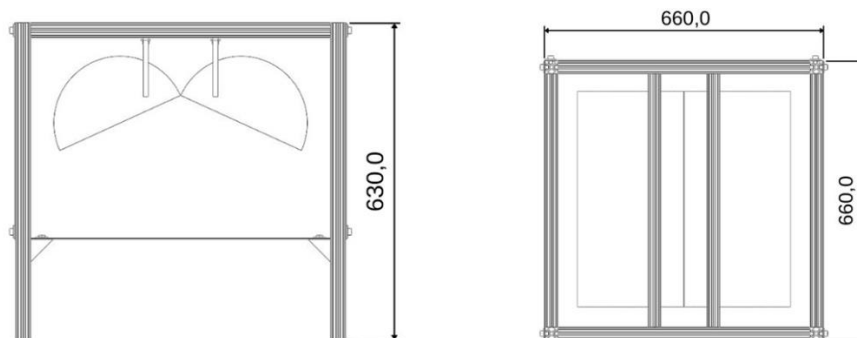
A partir do dimensionamento pré-definido na seção de premissas do projeto, foi projetada a estrutura do simulador solar, considerando uma área útil de $2500 \text{ cm}^2 = 0,25 \text{ m}^2$ (50 cm de largura e 50 cm de comprimento) para abranger a área de testes e a área superior de fixação dos refletores com as lâmpadas. A área total da bancada foi definida como $3600 \text{ cm}^2 = 0,36 \text{ m}^2$ (60 cm de largura e 60 de comprimento). A altura total da estrutura também foi definida com 60 cm de altura, tendo uma altura útil

prevista de 40 cm (distância entre a mesa de testes e o topo da estrutura para fixação dos refletores). A altura entre as lâmpadas e a mesa de testes é de 25 cm.

Para a estrutura foi escolhida a utilização de um perfil de alumínio com seção reta 30 mm x 30 mm sabendo que é um material com boa condutividade térmica e de baixa densidade, comparado ao aço. As laterais da estrutura foram fechadas com chapas de alumínio polido com objetivo de refletir a radiação emitida pelas lâmpadas e garantir a máxima eficiência do simulador. A mesa de trabalho do simulador foi construída para que sua distância das lâmpadas seja ajustável; assim, é possível regular a altura para que a irradiância sobre as células solares testadas seja 1000 W/m^2 ou qualquer outro valor desejado, dentro das possibilidades do equipamento.

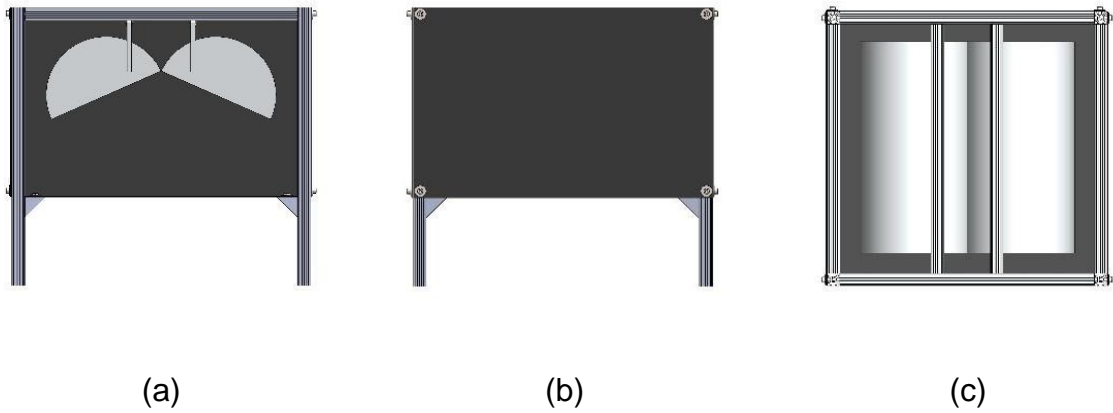
Com as devidas informações foi utilizado o software SolidWorks para projetar a estrutura do simulador e validá-la para a construção. A Figura 11 mostra as vistas isométricas com as cotas, a Figura 12 as principais vistas do projeto e a Figura 13 a perspectiva principal.

Figura 11 - Vistas com cotas do projeto. A imagem da direita representa a vista frontal e a da esquerda a vista superior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Vista (a) frontal, (b) lateral e (c) superior do simulador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Perspectiva explicativa do projeto do simulador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na perspectiva representada na Figura 13 é possível observar as partes da estrutura do simulador listadas. O item 1 mostra as colunas da estrutura do simulador compostas por perfilado de alumínio, o item 2 mostra as chapas de alumínio de revestem o simulador, o item 3 a bancada de trabalho, ou área de testes e o item 4 os refletores que envolvem as lâmpadas.

3.4.2 Construção do simulador solar

Com o projeto devidamente finalizado e validado, foram comprados os materiais para a construção do simulador. Na Tabela 3 são apresentados os materiais e os respectivos valores, totalizando um valor estimado em torno de R\$3390,00, um valor bem abaixo do praticado pelo mercado, onde, de acordo com valores obtidos em 2015, o simulador Solsim produzido pela Orbital Engenharia, com as mesmas dimensões do simulador deste produto custava R\$49.875,00.

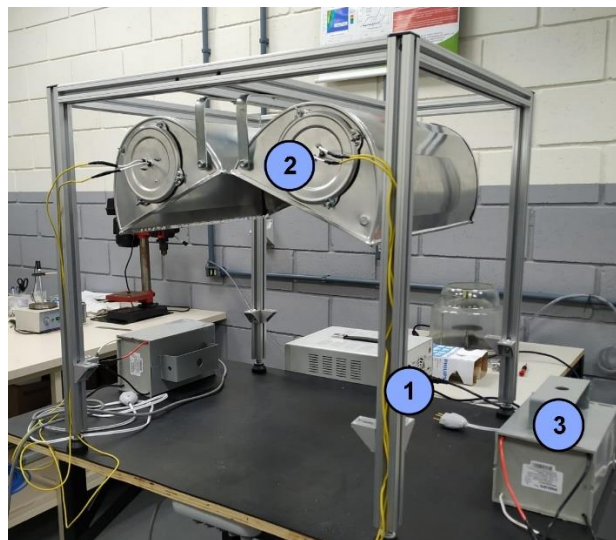
Tabela 3 - Materiais utilizados na construção do simulador e preços.

Material	Valor
2 lâmpadas Philips HPI-T de 1000 W	R\$ 1200,00
2 refletores para lâmpadas de 1000 W	R\$ 540,00
2 reatores para lâmpadas Philips HPI-T de 1000 W	R\$ 800,00
Perfil de alumínio, porcas, parafusos, cantoneiras e pés de apoio	R\$ 500,00
Chapa de alumínio para paredes do simulador	R\$ 320,00
Cabo e tomadas	R\$ 30,00
Total	R\$ 3390,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figura 14 e 15 mostram algumas etapas de construção. A Figura 16 mostra o equipamento finalizado. A altura da mesa de testes foi definida para que a irradiância no meio da mesa seja em torno de 1000 W/m^2 .

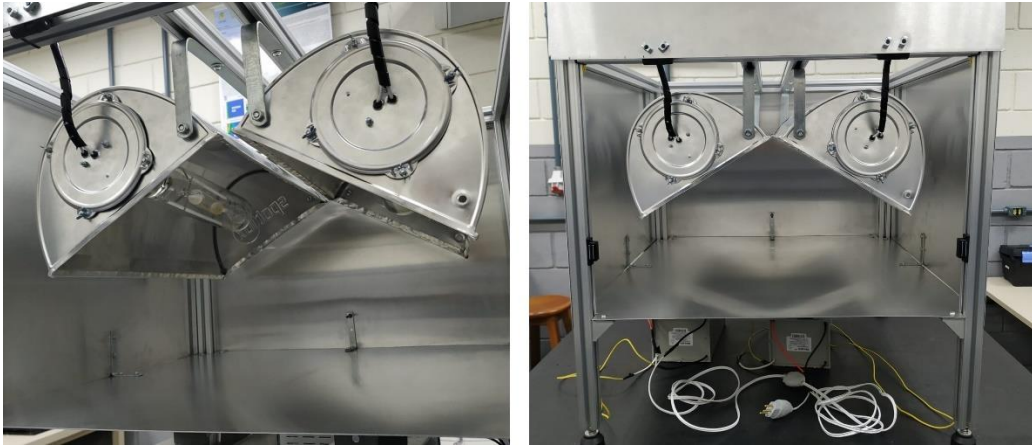
Figura 14 - Construção da estrutura interna do simulador solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na numeração apresentada na Figura 14 é possível observar, indicado em 1, a estrutura das colunas do simulador, montadas em perfil de alumínio 30x30 mm, em 2 os refletores das lâmpadas com o encaixe para os respectivos bocais e em 3 o reator individual de uma das lâmpadas.

Figura 15 - Enclausuramento do simulador solar. Na imagem a direita nota-se os refletores com as respectivas lâmpadas encaixadas nos bocais e na imagem a esquerda tem-se uma visão generalizada da área de trabalho interna.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Perspectiva do simulador finalizado.



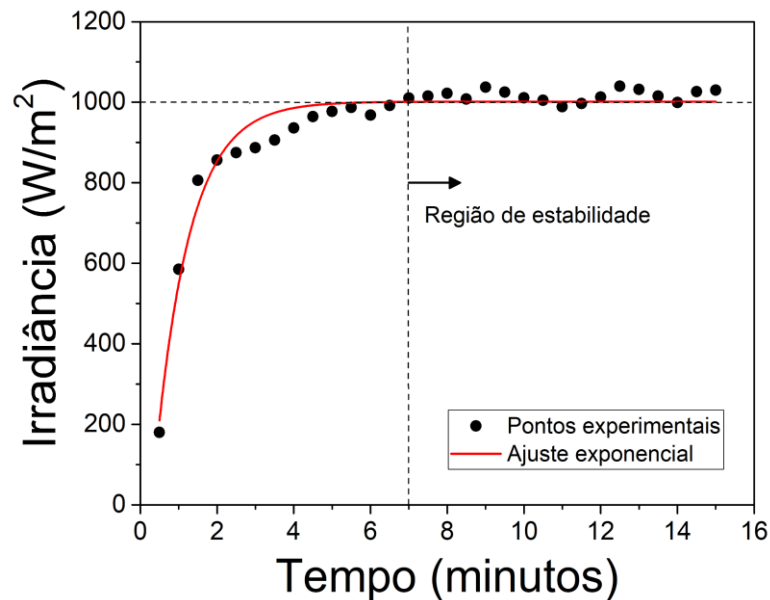
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a finalização do simulador, o dispositivo foi caracterizado por meio da obtenção do mapa de irradiação sobre a mesa de testes, tempo de estabilização da lâmpada, temperatura média da mesa de testes e obtenção dos valores de tensão em circuito aberto (V_{OC}) e corrente em curto circuito (I_{SC}) de uma célula solar padrão de silício cristalino de 1 W (5 V e 200 mA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As primeiras medições foram feitas com o intuito de aferir a estabilidade da irradiância ao longo do tempo, definindo o tempo que o simulador leva para atingir a irradiância padrão de 1000 W/m^2 após ligado. A Figura 17 representa o valor da irradiância aferida a cada 30 segundos após o simulador ser ligado. Cada ponto gerado é representado no gráfico assim como o ajuste exponencial obtido com o conjunto de pontos.

Figura 17 - Estabilidade do simulador ao longo do tempo.



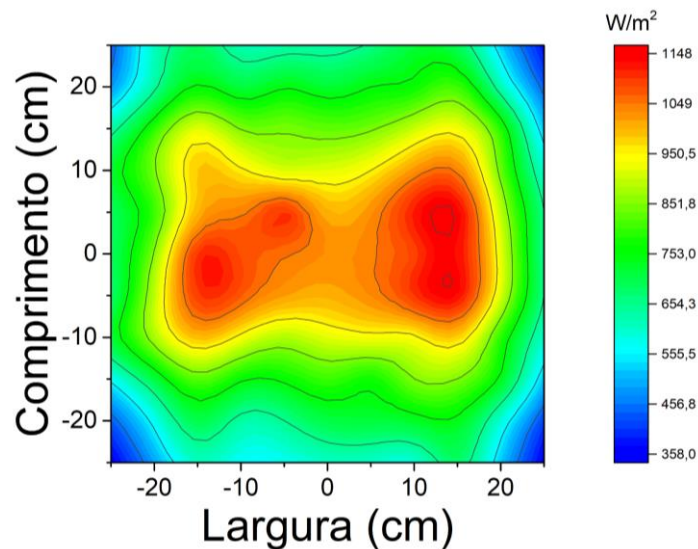
Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar que o simulador atinge o valor de 1000 W/m^2 em, aproximadamente, 7 minutos de operação e nos segundos seguintes se estabiliza, variando em torno de uma faixa média de $\pm 4,5\%$ da irradiância padrão de 1000 W/m^2 .

Após a estabilização das lâmpadas, foi realizado o mapeamento da irradiância na área útil de testagem ($50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$). A Figura 18 apresenta o mapa da irradiância obtido com o radiômetro, utilizado para aferir os valores de forma manual ponto a ponto no plano cartesiano definido na área de amostragem (bancada de testes do simulador), com a distância de 5 cm entre pontos medidos. Para a aferição desses valores a área útil da bancada de testes ($50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) foi marcada com pontos equidistantes em 5 cm entre si nos eixos x e y, gerando um total de 121 pontos, sendo

o ponto central da bancada, a origem do sistema de coordenadas neste plano horizontal, pois é o ponto definido como referência para o sistema, onde a irradiância atingiu 1000 W/m^2 .

Figura 18 - Mapa de irradiância na área de testagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

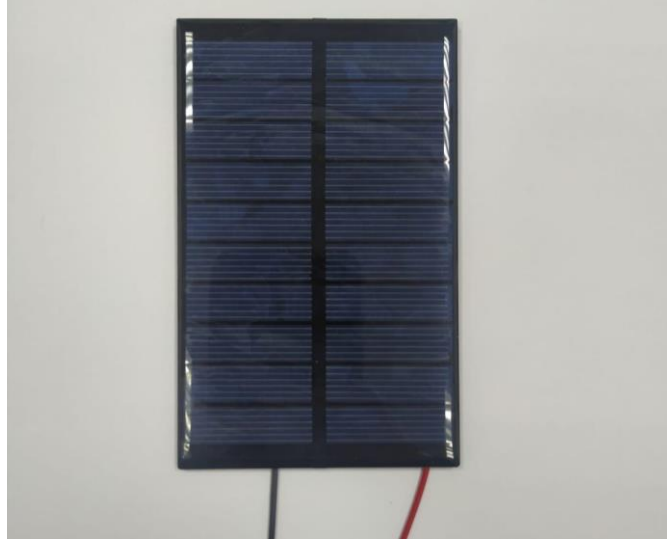
Durante os testes, a mesa de testes atingiu uma temperatura interna média de 70°C , e através dos dados obtidos no mapa de irradiância, é possível verificar que a área útil ideal para caracterização das células solares é a área central com largura de 40 cm por 20 cm de comprimento, que compreende uma região com irradiância em torno de 1000 W/m^2 .

Considerando os valores de irradiância obtidos, foi calculada a uniformidade da irradiação através da porcentagem do desvio padrão. Com uma amostragem contendo os valores de irradiância em toda a área de 40 cm de largura por 20 cm de comprimento, obteve-se uma uniformidade de 9,57%, considerando um valor médio de irradiância na área de 1000 W/m^2 para a amostragem contendo 45 pontos analisados e um desvio padrão sobre os dados desta amostragem de 95,75.

Para finalizar a validação do simulador, uma célula solar padrão com potência de 1 W, mostrada na Figura 19, foi posicionada no centro da área útil da bancada, onde a irradiância padrão de referência é 1000 W/m^2 , para aferir a tensão em circuito aberto e a corrente em curto geradas pela célula quando exposta no simulador em funcionamento, como pode-se ver na Figura 20. Durante as medições, a tensão em

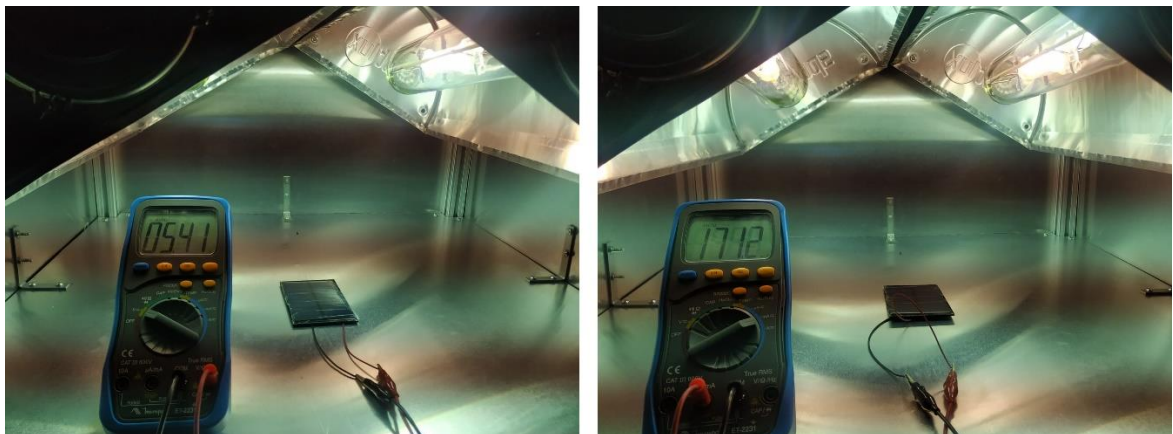
circuito aberto, que é a maior tensão que a célula produz, foi de 5,9 V. E a corrente em curto medida, que é a maior corrente produzida pela célula, foi de 177 mA, totalizando uma potência teórica máxima de $5,9 \times 0,177 \cong 1,04$ W.

Figura 19 - Célula solar padrão de silício cristalino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Validação do simulador para medir a tensão e corrente gerada pela célula solar padrão posicionada no centro da área útil da bancada, onde a irradiância padrão de referência é 1000 W/m^2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda para validação, foi feita uma estimativa do espectro emitido pelo simulador. A falta de um espectrômetro em laboratório, impossibilitou a medição do espectro de forma exata, porém, de acordo com a Figura 1, sabendo que a irradiância espectral de corpo negro do sol possui uma temperatura de 5900 K e que a temperatura de cor das lâmpadas é de 4300 K, foi calculado o erro relativo, obtendo

um valor de casamento espectral para o espectro do Sol e das lâmpadas de 27%. Com isso estima-se que a curva do espectro das lâmpadas possui um pico abaixo do pico da curva do espectro do Sol, *i.e.*, deslocada para maiores comprimentos de onda, que pode ser estimada por meio da lei de deslocamento de Wien (MARCONATO, 2022):

$$\lambda = \frac{a}{T} \quad (3)$$

Em que λ é o comprimento de onda da radiação emitida pela fonte luminosa de temperatura $T = 4300$ K (fornecido pelo fabricante), e $a = 2.897 \times 10^{-3}$ m·K é uma constante. Com a equação é possível mostrar que o pico de emissão da lâmpada está em torno de $\lambda = 603$ nm, que compreende a região visível, mas mais deslocado do laranja. Considerando um corpo com a temperatura da superfície do Sol (5900 K), o comprimento de onda está em torno de 491 nm, que é a região do espectro visível na cor azul.

Dos resultados é importante frisar a uniformidade da radiação, estabilidade temporal e o casamento espectral. Com esses valores é possível classificar a categoria do simulador solar de acordo com a normatização da NBR 11879 (ABNT, 1991, p. 1-3), apresentada na Tabela 1, e seção 2.3 deste trabalho. Para a uniformidade da radiação na área de teste, foi calculada a porcentagem do desvio padrão sobre a amostragem de dados da irradiação coletados em pontos equidistantes em 5 cm na área de teste com 40 cm por 20 cm, onde foi encontrado um valor para a uniformidade da radiação em 9,57%. Analisando a Tabela 1, para essa categoria, o valor encontrado enquadra o simulador deste projeto na Classe C. Já com relação a estabilidade temporal, foi aferida a irradiância ao longo do tempo em um período de 15 min, como apresentado na Figura 16. Para os valores de irradiância após a estabilização em 7 min, a estabilização temporal do simulador ficou em $\pm 4,5\%$. Analisando a Tabela 1, para essa categoria, o valor encontrado enquadra o simulador deste projeto na Classe B. Por fim, a estimativa do valor do casamento espectral entre o espectro emitido pelas lâmpadas e o espectro emitido pelo sol na superfície da Terra, foi de 27%, considerando o cálculo de erro padrão entre as temperaturas de cor da lâmpada e do Sol. Cruzando o dado obtido com os valores na Tabela 1, para essa categoria o simulador é enquadrado na Classe B.

Como isso, considerando que o projeto atingiu Classe C para Uniformidade da Radiação, Classe B para estabilidade temporal e Classe B para Casamento Espectral, prevalece a Classe menor, portanto, o simulador construído é caracterizado como um Classe C.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho, foi projetar e construir um simulador solar de baixo custo para caracterização de células fotovoltaicas de acordo com alguns requisitos iniciais de projeto e considerando que o mesmo deve-se estar dentro da classificação normatizada pela NBR 11879. Os resultados se mostraram satisfatórios e o projeto e dimensionamento do simulador resultou em um equipamento operacional, que cumpriu com os requisitos solicitados e se enquadrou em uma classificação válida da norma, sendo categorizado como um simulador Classe C, com a possibilidade de ser continuamente melhorado.

O equipamento também foi finalizado apresentando um baixo custo em sua construção, R\$3390, um valor importante que reforça seu desenvolvimento para fins acadêmicos e viabiliza a exploração comercial do projeto.

Futuramente, sugere-se o desenvolvimento de um sistema de refrigeração, para baixar a temperatura média em operação do equipamento, que foi aferida em 70°C, principalmente no plano da área de testes. Para isso é possível considerar um sistema de troca de calor e até mesmo pequenos exaustores.

REFERÊNCIAS

- AMALFI, S. L. **Energia solar**. 2005. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G173-03e**. Standard tables for reference solar spectral irradiances. 20 p. ASTM, 2003. Disponível em: <https://www.astm.org/g0173-03r12.html>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11879**. Dispositivos fotovoltaicos – simulador solar – requisitos de desempenho. 3 p. NBR, 1991.
- BECKER, B. K. Reflexões sobre hidrelétricas na Amazônia: água, energia e desenvolvimento. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 7, n. 3, p. 783-790, dez. 2012.
- BEESON, E. J. G. The CSI lamp as a source of radiation for solar simulation. **Lighting Research & Technology**, v. 10, n. 3, p.164-166, sep. 1978.
- BEZERRA, F. D. Energia solar. **Caderno setorial: ETENE (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste)**, Fortaleza, v. 6, n. 174, 15 p., jul. 2021.
- BRITO, M. C. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O Instalador**, v. 25, n. 676, 7 p., jul. 2006.
- CARVALHO, M. et al. Effects of the COVID-19 pandemic on the Brazilian electricity consumption patterns. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 2, p. 3358-3364, feb, 2021.
- CASSINI, D. A. et. al. Estudo da degradação em módulos fotovoltaicos de filme fino. *In*: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. **Anais CBENS 2020**, Fortaleza, 1 e 5 de junho de 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/823>. Acesso em 15 fev. 2022.
- CHAWLA, M. K. A step by step guide to selecting the “right” solar simulator for your solar cell testing application. **Photo Emission Tech., Inc.**, v. 1, n. 5, 7 p., sep. 2018.
- COSTA, E. R. et. al. Desenvolvimento de simulador solar para exposição contínua de módulos fotovoltaicos. *In*: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. **Anais CBENS 2018**, Gramado, 17 e 20 de abril de 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/641>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- COSTA, E. R. **Desenvolvimento de simulador solar contínuo para teste de estabilização de módulos fotovoltaicos**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.
- DEEPAK. Light sources selection for solar simulators: a review. **WEENTECH Proceedings in Energy**, v. 6, n. 2, p. 28-46, jul. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**: ano base 2017. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ENERGÊS. **Entenda as principais degradações do módulo fotovoltaico**. Energês a linguagem da energia. Disponível em: <https://energes.com.br/entenda-as-principais-degradacoes-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

FREIRE, F. **Como funciona a célula fotovoltaica**. Share Energy. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GUEYMARD, C. et. al. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing, **Solar Energy**, v. 73, n. 6, p. 443–467, dec. 2002.

GUNTHER, M. **Design and validation of LED-Based solar simulator for solar cell and thermal testing**. 2020. Dissertation (Master of Science in Aerospace Engineering) - Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo, 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Novo simulador Solar**. Disponível em: https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=565. Acesso em: 15 fev. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. **International Energy Agency**, v. 1, n. 4, p. 224, oct. 2021.

KASTEN, F. et. al. Revised optical air mass tables and approximation formula. **Applied Optics**, v. 28, n. 1, p. 4735–4738.1989.

KIM, K. A. et. al. Low-cost solar simulator design for multi-junction solar cells in space applications. *In: Proceedings of 2014 POWER AND ENERGY CONFERENCE AT ILLINOIS (PECI)*. Champaign, feb, 28 to mar 1, 2014. Available in: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6804544>. Acesso em: 15 fev. 2022.

KOBER, T. et al. Global energy perspectives to 2060: WEC's world energy scenarios 2019. **Energy Strategy Reviews**, v. 31, n. 100523, 19 p., sep. 2020.

KRELL, A. J; SOUZA, C. B. C. A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 11, n. 2, p. 157-188, ago. 2020.

LANCA, C. et al. The Effects of Different Outdoor Environments, Sunglasses and Hats on Light Levels: Implications for Myopia Prevention. **Translational Vision Science & Technology**, v. 8, n. 4, jul. 2019.

MACHADO, C. T; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, out. 2014.

MARCONATO, A. J. **Sistema para monitoramento de radiação ultravioleta: uma ferramenta de auxílio no combate ao câncer de pele.** 2022. Monografia (Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2022.

MATSON, R. J. et. al. Terrestrial solar spectra, solar simulation and solar cell short-circuit current calibration: a review. **Solar Cells**, v. 11, n. 2, p. 105-145, mar. 1984.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.** 2004. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.

NASSER, E. **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics.** [S.l.]: John Wiley Sons, 1970.

PEREIRA, F. A. V. **Desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2017.

PHILIPS. Iluminação –**Noções Básicas de Iluminação.** Informação de produto: Informação de Aplicação, São Paulo, 2010.

PROCEL EPP, **Manual de Iluminação.** Agosto de 2011.

QUASCHNING, V. Technology fundamentals - photovoltaic systems. **Renewable Energy World**, v. 7, n. 4, p. 81-84, jan. 2004.

RODRIGUES, J. R. H. **Projeto e construção de um simulador solar concentrador.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SAHEB, Y. **Climate Change Conference: sufficiency should be first.** Buildings and Cities Journal. Disponível em: <https://www.buildingsandcities.org/insights/commentaries/cop26-sufficiency.html>. Acesso em: 13 dez. 2021.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **PV performance modeling collaborative.** Disponível em: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-response/>. Acesso em: 03 fev. 2022.

SIEGEL, N. P. et. al. Design, modeling, and characterization of a 10 kWe metal halide high flux solar simulator. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 140, n. 4, 07 p., aug. 2018.

STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. **2021.** 70 ed. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 15 fev. 2022.

STENSMANN, B. H. W. **Energia emitida pelo sol.** Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef008/mef008_02/Berenice/aula4.html. Acesso em: 15 fev. 2022.

STENSMANN, B. H. W. **Energia emitida pelo sol**. Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef008/mef008_02/Berenice/aula4.html. Acesso em: 15 fev. 2022.

TOMALSQUIM, M. T. Matriz energética: uma perspectiva. **Novos Estudos - CEBRAP**, v. 1, n. 79, p. 47-69, jul. 2008.

VEISSID, N. et. al. Simulador solar de baixo custo (SOLSIM): simulação da corrente fotogerada em diferentes células solares. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 1, p. 71-77, jul. 2011.

VIGANO K. R. P. et. al. Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853 on solar simulators and under natural sunlight. **Prog Photovolt**, v. 21, n. 6, p. 1384–1399, sep. 2013.

APÊNDICE A – Datasheet Lâmpada de Vapor Metálico Philips HPI-T 1000W.

HPI-T High Wattage

HPI-T 1000W/543 E40 1SL/4

Quartz metal halide lamps with clear outer bulb

Warnings and Safety

- Use only in totally enclosed luminaire, even during testing (IEC61167, IEC 62035, IEC60598)
- The luminaire must be able to contain hot lamp parts if the lamp ruptures
- For use with control gear designed for high-pressure mercury lamps
- A lamp breaking is extremely unlikely to have any impact on your health. If a lamp breaks, ventilate the room for 30 minutes and remove the parts, preferably with gloves. Put them in a sealed plastic bag and take it to your local waste facilities for recycling. Do not use a vacuum cleaner.

Product data

General Information		Operating and Electrical	
Cap-Base	E40 [E40]	Chromaticity Coordinate Y (Nom)	390
Operating Position	P [Parallel or Horizontal(HOR)]	Correlated Color Temperature (Nom)	4300 K
Life to 5% Failures (Nom)	3000 h	Luminous Efficacy (rated) (Nom)	83 lm/W
Life To 10% Failures (Nom)	5500 h	Color Rendering Index (Nom)	57
Life to 20% Failures (Nom)	8000 h		
Life to 50% Failures (Nom)	12000 h	Lamp supply voltage	220 V [220]
System Description	-	Power (Nom)	990 W
		Lamp Current Run-Up (Max)	14.2 A
		Lamp Current (EM) (Nom)	8.25 A
		Ignition Supply Voltage (Max)	198 V
		Ignition Supply Voltage (Min)	198 V
		Ignition Time (Max)	30 s
		Voltage (Max)	140 V
		Voltage (Min)	120 V
		Voltage (Nom)	130 V
Light Technical			
Color Code	543 [CCT of 4300K]		
Luminous Flux (Rated) (Min)	73890 lm		
Luminous Flux (Rated) (Nom)	82100 lm		
Color Designation	Cool White (CW)		
Lumen Maintenance 10000 h (Nom)	75 %		
Lumen Maintenance 2000 h (Nom)	87 %		
Lumen Maintenance 5000 h (Nom)	80 %		
Chromaticity Coordinate X (Nom)	370		

Fonte: (Philips, 2021)