

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

ANTONIO AUGUSTO CIPRIANI

ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE DE RUTÊNIO E MIRTILO

Joinville

2023

ANTONIO AUGUSTO CIPRIANI

ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE DE RUTÊNIO E MIRTILO

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: Prof. Diego Alexandre Duarte

Coorientador: Prof. Kleber Vieira de Paiva

Joinville

2023

ANTONIO AUGUSTO CIPRIANI

ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE DE RUTÊNIO E MIRTILO

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), 30 de junho de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Diego Alexandre Duarte
Orientador/Presidente

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

Dr. Francisco Alfaro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me dar forças para conclusão de mais uma etapa da minha vida.

Agradeço à minha família, em especial meus pais e à minha vó, que são as pessoas mais importantes da minha vida, por tudo que já fizeram e fazem por mim. Sem a educação e estímulo ao estudo durante toda minha vida, este trabalho não existiria.

Agradeço ao Prof. Diego Alexandre Duarte, orientador deste trabalho, não só por ser excelente como amigo, pessoa e professor, mas também pela sua dedicação na orientação da construção deste trabalho. Durante os três anos em que trabalhei no Laboratório de Tratamento de Superfícies, agradeço por sanar todas minhas incessáveis dúvidas acerca do mundo da física, sempre instigando a busca por respostas e pensamento crítico.

Agradeço ao Prof. Kleber Viera de Paiva, coorientador deste trabalho, por toda ajuda relacionada à modelagem do sistema de refrigeração do simulador utilizando seus conhecimentos na área de transferência de calor.

Agradeço ao Prof. Julio César Sagás, do Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies, e ao Prof. Ricardo Antônio de Simone Zanon, do Laboratório de Filmes Finos, da UDESC Joinville, pelas análises de perfil dos filmes de TiO_2 utilizando a técnica de perfilometria de contato.

Agradeço à Ellen Mayumi Miyake da Silva, colega do ambiente de laboratório, pela dedicação, estudo aprofundado e produção dos corantes orgânicos à base de mirtilo desenvolvidos para esse trabalho, além das medições de absorbâncias por espectrofotometria.

Sou grato a todos os meus amigos, que me apoiaram durante todo o processo com companheirismo, renovando constantemente minhas energias com risadas nos momentos felizes e conselhos nos momentos difíceis. O processo seria muito mais árduo sem vocês ao meu lado.

RESUMO

Com a crescente demanda de energia por fontes renováveis a fim de substituir os combustíveis fósseis e sua dependência, a luz solar tem sido uma das principais fontes de energia que o mercado internacional tem tido enfoque, principalmente pela crise de abastecimento que aconteceu durante os eventos da pandemia. Apesar da pandemia, o Brasil aumentou cerca de 56% a produção de energia solar entre os anos de 2020 e 2021. Neste trabalho apresenta-se uma análise das propriedades elétricas de células solares sensibilizadas por corante a base de rutênio e de mirtilo, sendo esse um tipo de célula solar um potencial substituto das clássicas células de silício em certas aplicações, devido ao seu menor impacto ambiental e fácil fabricação. Uma célula solar sensibilizada por corante possui como sua construção, a fabricação e deposição de filmes finos de dióxido de titânio (TiO_2) depositado sobre um óxido transparente e condutor (TCO), adjunto de um eletrólito líquido e um contra eletrodo contendo platina. Para que fosse possível o experimento, foi necessária a confecção de um módulo de refrigeração para o simulador solar encontrado no Laboratório de Tratamento de Superfícies da UFSC, de forma que mantivesse as células analisadas em temperatura de operação. O sistema foi implementado com sucesso, e as propriedades elétricas como medição da densidade corrente em curto-circuito (J_{sc}) e da tensão em circuito aberto (V_{oc}) foram obtidas imediatamente após a construção das células. Os resultados apontaram para célula sensibilizada por corante de rutênio um J_{sc} de $0,67 \text{ mA/cm}^2$ e V_{oc} de $0,840 \text{ V}$, enquanto a sensibilizada por mirtilo teve dados de J_{sc} de $0,14 \text{ mA/cm}^2$ e V_{oc} de $0,535 \text{ V}$. Os dados foram comparados à literatura, e mecanismos para melhoria de performance são sugeridos.

Palavras-chave: Célula solar sensibilizada por corante. Dióxido de Titânio. Corante orgânico. Refrigeração de Simulador Solar.

ABSTRACT

With the growing demand for renewable energy sources to replace fossil fuels and reduce dependency on them, solar energy has become one of the main sources of energy that the international market has focused on, especially due to the supply crisis during the COVID-19 pandemic. Brazil increased its solar energy production by about 56% despite the pandemic between 2020 and 2021. This work presents an analysis of the electrical properties of dye sensitized solar cells based on ruthenium and blueberry, which are potential substitutes for traditional silicon solar cells on certain applications due to their lower environmental impact and easy fabrication. A dye-sensitized solar cell is constructed by manufacturing and depositing thin films of titanium dioxide (TiO_2) on a transparent and conductive oxide (TCO), along with a liquid electrolyte and a counter electrode containing platinum. To enable the experiment, a cooling module was designed and fabricated for the solar simulator found in the Laboratory of Surface Treatments at UFSC to maintain the analyzed cells at their operating temperature. The system was successfully implemented, and the electrical properties such as short-circuit current density (J_{sc}) and open-circuit voltage (V_{oc}) were immediately obtained after the construction of the cells. The results showed that the ruthenium-based DSSC had a J_{sc} of 0.67 mA/cm^2 and a V_{oc} of 0.840 V , while the blueberry-based DSSC had J_{sc} and V_{oc} values of 0.14 mA/cm^2 and 0.535 V , respectively. The data were compared with the literature, and mechanisms for improving performance are suggested.

Keywords: Dye Sensitized Solar Cells. Titanium Dioxide. Organic Dye. Solar Simulator Cooling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenvolvimento de camada limite hidrodinâmica laminar em um tubo circular.....	14
Figura 2 – Números de Nusselt nas regiões de entrada totalmente desenvolvidas para escoamento laminar em um tubo circular.....	16
Figura 3 – Estrutura de uma célula solar sensibilizada por corante	18
Figura 4 – Diagrama do ciclo de funcionamento da uma DSSC.	19
Figura 5 – Espectro de luz solar.....	21
Figura 6 – Curva característica da densidade de corrente em função tensão elétrica para uma célula solar.	22
Figura 7 – Simulador solar com (a) tampa fechada (b) refletores instaladas	24
Figura 8 – Perspectiva isométrica do bloco de refrigeração sem conexões.....	26
Figura 9 – Área de seção reta do bloco de refrigeração	27
Figura 10 – Estrutura montada do bloco de refrigeração.	28
Figura 11 – Eletrodo de trabalho após a deposição de TiO_2	30
Figura 12 – Eletrodos de trabalho sensibilizados com solução de (a) rutênio e (b) mirtilo.....	31
Figura 13 – Verificação da atividade catalítica do CE.	33
Figura 14 – Perfilometria dos filmes produzidos de TiO_2	34
Figura 15 – DSSCs produzidas com (a) rutênio e (b) mirtilo.	35
Figura 16 – Ilustração de um circuito elétrico utilizado para medição das curvas corrente-tensão.	36
Figura 17 – Mapa de calor da temperatura no interior do simulador solar resfriado.	37
Figura 18 – Espectrofotometria dos corantes utilizados.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de simuladores solares pela NBR 11879 da ABNT	25
Tabela 2 – Resultados da modelagem.....	27
Tabela 3 – Propriedades elétricas das células solares construídas.....	38
Tabela 4 – Síntese de resultados da literatura sobre propriedades elétricas de célula solares sensibilizadas por corante à base de rutênio.....	39
Tabela 5 – Síntese de resultados da literatura sobre propriedades elétricas de células solares sensibilizadas por corantes orgânicos.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- C – Carbono
- CE – Contra Eletrodo (Counter Electrode)
- CTJ – Centro Tecnológico de Joinville
- DSSC – Célula Solar Sensibilizada por Corante (Dye Sensitized Solar Cell)
- EBPVD – Deposição física de vapor por feixe de elétrons (Electron-beam physical vapor deposition)
- EIA – Energy Information Administration
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- FF – Fator de Preenchimento (Fill Factor)
- FTO - Óxido de estanho dopado com flúor (Fluorine-doped Tin Oxide)
- HOMO – Orbital Molecular Ocupado Mais Alto (Highest Occupied Molecular Orbital)
- IV – Infravermelho
- LaTS – Laboratório de Tratamento de Superfícies
- LUMO – Orbital Molecular Ocupado Mais Baixo (Lowest Unoccupied Molecular Orbital)
- Nu – Número de Nusselt
- PEG – Polietilenoglicol
- PO – Pigmento Orgânico
- Pt – Platina
- SI – Sistema Internacional de Unidades
- SiGM – Silício Grau Metalúrgico
- SiGS – Silício De Grau Solar
- TCO – Óxido Condutor Transparente (Transparent Conducting Oxide)
- TiO₂ – Dióxido de Titânio
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- UV – Ultravioleta
- VIS – Visível
- WE – Eletrodo de Trabalho (Working Electrode)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. ESCOAMENTOS INTERNOS	13
2.2. FUNCIONAMENTO DE CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE	17
2.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS CÉLULAS SOLARES.....	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA O SIMULADOR SOLAR	24
3.2. CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE	29
3.2.1. Eletrodo de Trabalho (WE)	29
3.2.2. Contra Eletrodo (CE)	32
3.2.3. Finalização da Célula	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A – CÓDIGO EM PHYTON PARA MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO SIMULADOR SOLAR	50
ANEXO A – DATASHEET DAS LÂMPADAS DE VAPOR METÁLICO PHILIPS HPI- T 1000W UTILIZADAS NO SIMULADOR SOLAR	52

1. INTRODUÇÃO

Acontecimentos históricos a partir da revolução industrial resultaram num modelo de desenvolvimento socioeconômico que implica no consumo desenfreado de energia. Evidencia-se tal situação pelo fato do consumo energético baseado em energia não renovável ter duplicado entre os anos de 1974 e 2004, principalmente utilizando combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2007).

Uma das consequências da pandemia da COVID-19 para a geopolítica e economia global, foi o aumento dos preços de matérias primas energéticas, na maioria dos setores industriais, devido a atrasos na cadeia de suprimentos, simultaneamente, assim como o conflito de guerra entre a Federação Russa e a Ucrânia no primeiro trimestre de 2022, que também resultou no aumento do custo dos combustíveis derivados de petróleo (REN21, 2022). Devido a esses fatos, a atenção mundial aumentou sobre a matriz energética, principalmente de fontes renováveis (ARAÚJO, 2022).

Apesar dos eventos atípicos, as energias renováveis representaram, pela primeira vez, mais de 10% da demanda energética mundial em 2021 (REN21,2022), e de acordo com o U.S. Energy Information Administration (EIA, 2022), a estimativa para 2050 é de que o consumo de energia renovável represente 27% da demanda mundial, valor cerca de 3% abaixo de consumo de combustíveis líquidos, incluindo biocombustíveis, previsto para a mesma data. Também é previsto que não haverá mudança no consumo de carvão até 2050, porém, com o acréscimo da demanda de energia, sofrerá queda de até 6% em relação com a energia relativa consumida (EIA, 2022).

A matriz elétrica brasileira, em 2021, apresentou queda de 7% em relação ao total consumido em 2020 devido à escassez hídrica ocorrida ao longo do ano, representando 54% do consumo de energia do país. Já a matriz fotovoltaica, mesmo com a pandemia da COVID-19 e suas consequências, aumentou cerca de 56% no ano de 2021 em relação a 2020, todavia, representa apenas a parcela de 2,5% do consumo energético nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2022).

Historicamente, o Brasil é um dos cinco maiores exportadores do silício grau metalúrgico (SiGM), porém, o SiGM tem um grau de pureza que o torna ineficiente

para a fabricação de painéis fotovoltaicos, sendo necessário a utilização do silício de grau solar (SiGS) (GOLDEMBERG, 2007). Entretanto, o SiGM pode ser refinado para SiGS, mas não há no Brasil tecnologia para tanto, onerando o custo dos módulos para o consumidor interno, já que o SiGS importado apresenta até 200 vezes mais valor agregado do que o SiGM exportado (SAMPAIO, 2019).

Considerando isso, pesquisas relacionadas ao processo de refinamento do silício ou alternativas que permitam a construção de células solares com matéria prima nacional, são necessárias e têm sido estimuladas pelo Plano Estratégico de Ciência, Tecnologia e Inovação 2018 - 2022, do Governo Federal (SAMPAIO, 2019). Uma das alternativas é a célula solar sensibilizada por corante (DSSC - dye sensitized solar cell), inspirada na fotossíntese das plantas (O'REGAN; GRAETZEL, 1991).

A DSSC é uma tecnologia de célula solar que consiste na união de dois eletrodos feitos de materiais diferentes, separados por uma solução eletrolítica. Um dos eletrodos é sensibilizado por um corante sintético ou orgânico e é responsável pela absorção da energia solar, gerando e transferindo elétrons na estrutura interna (DUARTE, 2013). Uma das vantagens significativas da DSSC é a sua capacidade de dispensar o uso de materiais de alto processamento já que comumente utiliza-se óxidos metálicos, tais como TiO_2 , Nb_2O_5 e ZnO , tornando-se um dispositivo atrativo para desenvolvimento comercial e investigação acadêmica (DUARTE, 2013; XUHUI et al., 2014). Esses painéis, entretanto, costumam utilizar metais pesados como o rutênio, cuja extração e descarte inadequados podem causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Portanto, a substituição de rutênio por corante orgânico pode ser uma alternativa mais sustentável e menos prejudicial para a geração de energia solar desse dispositivo.

A partir dessa premissa, este trabalho investiga a produção de DSSCs com corante de rutênio e mirtilo com a caracterização dos dispositivos realizadas através de medidas de tensão em circuito aberto e corrente em curto-circuito em ambiente solar simulado com aproximadamente 100 mW/cm^2 em $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Para isso foi necessário projetar um bloco de refrigeração forçada para o simulador solar construído por Janstch (2022), que é propriedade do Laboratório de Tratamento de Superfícies (LaTS), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e alcança temperaturas de até $70 \text{ }^\circ\text{C}$ em seu interior. Logo, a construção de um módulo de refrigeração visa reduzir a temperatura das células

solares para a temperatura de operação no padrão AM1.5 (~25 °C) durante os ensaios.

Este trabalho foi executado com a seguinte cronologia: (i) simulação, desenvolvimento em CAD, construção e validação de um trocador de calor usinado em alumínio; (ii) construção e caracterização das DSSCs em ambiente solar simulado; (iii) comparação das propriedades elétricas das DSSCs com os dados da literatura (CHANG; LO, 2010; CORRÊA, 2014; GOVINDRAJ et al., 2017; MOUNIR; AHMAD, 2012; NAZZERUDDIN, 2003; PALOMARES, 2002; POURANDARJANI; NASIRPOURI, 2018; SAMPAIO, 2014; VINAAYAK et al., 2022).

1.1. OBJETIVOS

Para desenvolver o trabalho sobre as células solares sensibilizadas por corante, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo geral

Construir células solares sensibilizadas por corantes de mirtilo e rutênio e avaliar suas propriedades elétricas.

1.1.2. Objetivos específicos

- Construir um bloco de refrigeração forçada para utilização no simulador solar desenvolvido por Janstch (2022);
- Produzir a solução sensibilizadora de mirtilo para sensibilização do eletrodo de trabalho da DSSC;
- Comparar a absorbância do mirtilo com o corante de rutênio;
- Construir protótipos de DSSCs com os corantes de mirtilo e rutênio;
- Caracterizar as DSSCs por meio da medição da tensão em circuito aberto e corrente em curto-circuito em ambiente solar simulado;
- Comparar os resultados obtidos para as DSSCs com a literatura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tendo em vista que o escopo do trabalho é desenvolver células solares sensibilizadas por corante, em ambiente de simulador solar capaz de reproduzir as condições do sol no padrão AM1.5 em condições de laboratório, sem que sobreaqueça ou danifique as células solares com ação de altas temperaturas, bem como efetuar medições e avaliar parâmetros de importância para comparações de células solares, este capítulo apresenta informações necessárias para compreensão do projeto, que engloba tópicos como a lei de resfriamento de Newton para escoamento interno que fundamentará a modelagem do bloco refrigerante a ser anexado no simulador solar construído por Janstch (2022), além dos princípios de funcionamento de uma célula solar sensibilizada por corante e seus parâmetros de interesse para análises e comparações.

2.1. ESCOAMENTOS INTERNOS

Um bloco de refrigeração a água é um componente utilizado em sistemas de refrigeração líquida para resfriar eficientemente os componentes que geram muito calor. Composto por uma base metálica em contato direto com a superfície do componente, o bloco é conectado a canais que permitem a passagem da água. A água circula pelos canais, resfriando a base metálica que absorve calor do simulador. Em seguida, a água aquecida é conduzida por tubulações para fora do sistema ou para um radiador, onde ocorre a dissipação do calor para o ambiente externo.

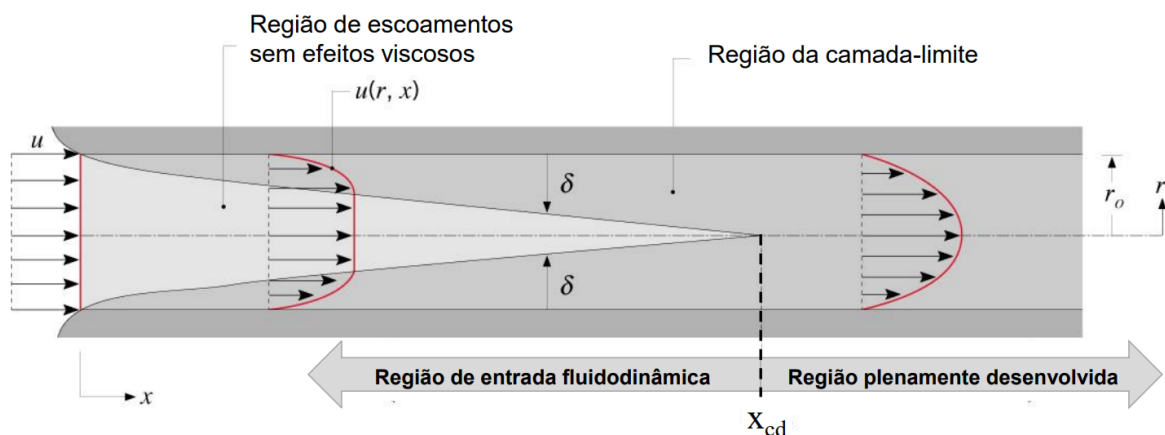
Para modelagem do bloco de refrigeração acoplado ao simulador solar, aproxima-se o comportamento da troca de calor da água nos dutos a um modelo de transferência de calor do tipo de escoamento interno. O objetivo é que a modelagem permita a determinação de parâmetros para o bloco como largura, comprimento do tubo, quantidade de canais e outros. Os escoamentos internos se referem ao estudo da fluidodinâmica e termodinâmica numa tubulação de seção transversal de forma qualquer. O objetivo geral dessa área de estudo é reproduzir a realidade através de modelagem matemática, além da obtenção do coeficiente convectivo h para condições de escoamento encontrada pela relação de convecção forçada, dada pela Equação 1 (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2014).

$$\dot{Q} = h \cdot \Delta T \quad (1)$$

Em que \dot{Q} representa o fluxo de calor, em W/m^2 , e ΔT a variação de temperatura média na entrada e na saída do tubo.

Entretanto, as soluções teóricas são obtidas apenas para casos simples, como escoamento laminar completamente desenvolvido em tubo circular; portanto, são os resultados experimentais que fornecem relações empíricas para a maioria dos problemas de escoamento (ÇENGEL, 2012). Há uma distinção entre tipos de escoamentos termodinâmicos e hidrodinâmicos ao longo de um tubo, como demonstra a Figura 1.

Figura 1 – Desenvolvimento de camada limite hidrodinâmica laminar em um tubo circular.



Fonte: Incropera (2014, p. 311).

De acordo com Incropera (2014), o fluido que entra com uma velocidade uniforme sofre os efeitos viscosos das paredes internas do tubo, conhecida como região de entrada. A região estende-se até o ponto onde o efeito é percebido por toda seção transversal e, neste ponto, a região passa a ser chamada de região plenamente desenvolvida, não havendo mais variação de perfil hidrodinâmico ou termodinâmico no decorrer do tubo.

O ponto onde ocorre a transição de regiões depende do regime de escoamento em que o fluido se encontra, e normalmente a região de entrada é do regime laminar, com o número de Reynolds abaixo de 2300 (INCROPERA, 2014). Para essa combinação de região e regime, a equação que fornece o ponto em que há

troca de regiões X_{cd} é dada pela Equação 2. Com o regime e região determinados, é possível buscar as relações empíricas apropriadas (ÇENGEL, 2012).

$$X_{cd} = 0,05 \cdot Re \cdot D \quad (2)$$

Em que x é o ponto de transição de região, em metros, Re é o número de Reynolds e D o diâmetro do tubo, em metros. Há dois principais tipos de condições de contorno para escoamento interno: (i) fluxo de calor constante e (ii) temperatura de superfície constante. Dada natureza do simulador solar em fornecer radiação constantemente à sua área de aplicação, a condição de contorno de fluxo de calor constante é a que mais se aproximaria de seu funcionamento real (ÇENGEL, 2012).

O coeficiente convectivo é dado pela Equação 3, que relaciona o número de Nusselt (Nu), coeficiente de condução do fluido k e diâmetro do tubo. O número de Nusselt, uma medida empregada na avaliação do coeficiente de transferência de calor por convecção, é tipicamente determinado por meio de correlações empíricas. No entanto, há escassa literatura disponível para sua determinação para condição de contorno de fluxo de calor constante, que seria a ideal para um simulador solar que irradia a área com um fluxo constante, porém, devido a impossibilidade de simplificar o gradiente de temperatura axial como no caso de um escoamento completamente desenvolvido, opta-se por utilizar a relação empírica conhecida para condição de contorno de temperatura de superfície constante, dada pela Equação 4, com L representando o comprimento do tubo, em metros, e Pr o número de Prandtl do fluido (ÇENGEL, 2012).

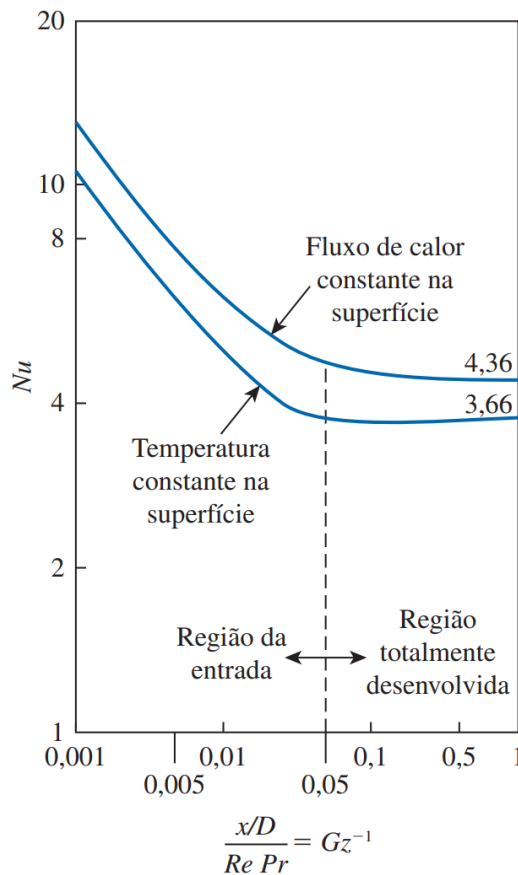
$$h = \frac{Nu \cdot K}{D} \quad (3)$$

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065 \cdot \left(\frac{D}{L}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) \cdot Re \cdot Pr\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

Essa consideração é válida pois o número de Nusselt da estrutura do bloco seria maior para todos os pontos de seu interior caso utilizada a condição de contorno de fluxo de calor constante, como mostra a Figura 2. Como o coeficiente de

transferência de calor é diretamente proporcional ao número de Nusselt, evidenciado pela Equação 3, o calor dissipado pelo bloco seria maior para condição de contorno de fluxo de calor constante. Dessa forma, a condição de contorno de temperatura de superfície constante apresenta valores maiores de temperatura quando comparada à outra condição e mesmos dados de entrada, exigindo uma estrutura maior do que o necessário. Porém não há problema em superdimensionar o sistema de refrigeração, uma vez que ele é uma adição permanente à bancada do simulador solar e será utilizado por outros projetos da UFSC.

Figura 2 – Números de Nusselt nas regiões de entrada totalmente desenvolvidas para escoamento laminar em um tubo circular.



Fonte: Çengel (2012, p. 484).

O parâmetro de interesse da modelagem é a temperatura de superfície interna do tubo, pois é reflexo da quantidade de energia dissipada pelo bloco de refrigeração construído e anexado ao simulador solar. Ao desenvolver as equações com base na condição de contorno de temperatura de superfície constante, pode-se encontrar a

temperatura na superfície interna do tubo T_{sup} , que é dada pela Equação 5 (ÇENGEL, 2012). Parâmetros de fluido como o número de Prundtl podem ser encontradas em tabelas termodinâmicas; o valor de fluxo de massa pode ser medido na entrada do sistema de refrigeração, enquanto os parâmetros geométricos do tubo e bloco são arbitrários, mas para o presente caso, a estrutura deve ser limitada pela área do simulador solar.

$$T_{\text{sup}} = T_{\text{med}} + \frac{\dot{Q} \cdot W}{h \cdot N \cdot \pi \cdot D} \quad (5)$$

Com T_{med} sendo a temperatura média entre a entrada e saída do tubo, W a largura do bloco de refrigeração e N a quantidade de tubos no bloco. A temperatura de superfície deve estar próxima da temperatura de operação da célula, e para isso os parâmetros são ajustados até cumprirem esse requisito.

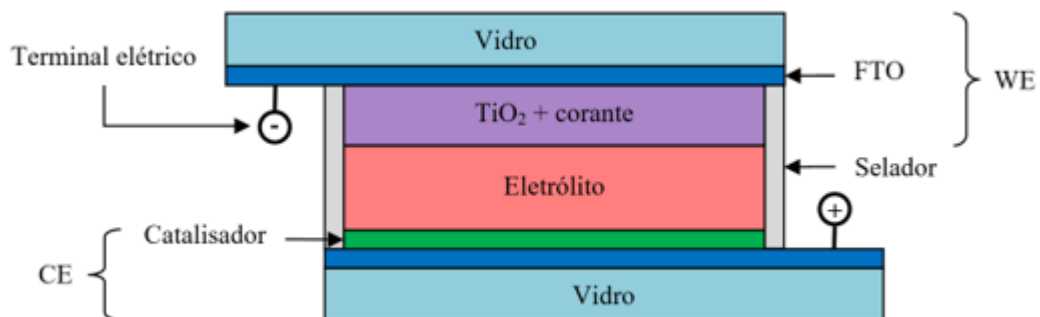
2.2. FUNCIONAMENTO DE CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE

A célula solar sensibilizada por corante é um dispositivo formado pela junção de um eletrodo de trabalho e um contra eletrodo separados por uma solução eletrolítica. O eletrodo de trabalho é formado por uma monocamada de corante depositada sobre a superfície de um filme semicondutor nanoporoso tais como dióxido de titânio (TiO_2) ou óxido de zinco (ZnO), devido a esse tipo de material possuir alta absorção no espectro ultravioleta (BRAGA, 2012). Antes da deposição da camada sensibilizadora, o semicondutor é depositado sobre um filme de óxido condutor transparente (Transparent Conducting Oxide - TCO) previamente depositado sobre uma lâmina de vidro, tal como o óxido de estanho dopado com flúor (Fluorine-doped Tin Oxide - FTO). A camada de semicondutor é posteriormente dopada por um corante sintético ou orgânico que é responsável pela absorção da luz solar dentro da célula (DUARTE, 2013).

O contra eletrodo (Counter Electrode - CE) é formado por um catalisador como carbono (C) ou platina (Pt) depositado sobre uma outra lâmina de TCO. A junção de eletrodos é efetuada, então a injeção de uma solução eletrolítica à base de iodo é

realizada na interface da junção para o transporte de cargas elétricas no interior da célula. A selagem da célula solar sensibilizada por corante é feita com auxílio de filme termoplástico, com objetivo de atuar como espaçador e aumentar o tempo de vida e operação do dispositivo, ao reduzir a quantidade de solução eletrolítica evaporada ou possíveis vazamentos. A célula e todos seus elementos são apresentados na Figura 3 (DUARTE, 2013).

Figura 3 – Estrutura de uma célula solar sensibilizada por corante



Fonte: Duarte (2013, p. 55).

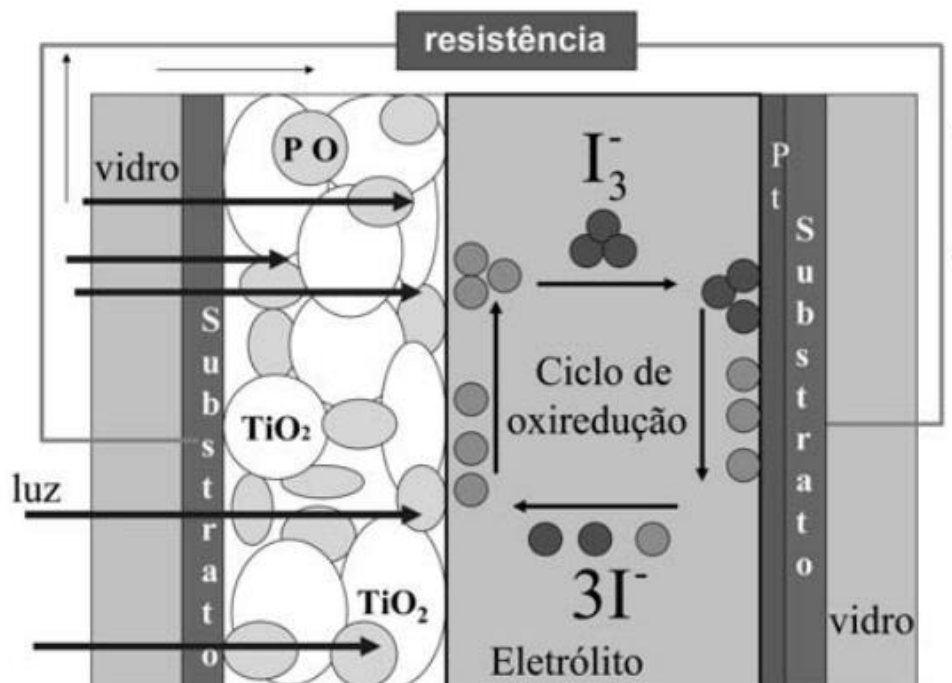
Os mecanismos de conversão de energia de uma DSSC com junção de eletrodos de TiO_2 e Pt são os seguintes (AGNALDO et al., 2006; ARAKAWA, 2003; BYRANVAND et al., 2012; DUARTE, 2013):

- Com a passagem da luz através do eletrodo de trabalho (Working Electrode - WE), os elétrons que estão no nível de valência do corante ou pigmento orgânico (PO) são excitados, deixando uma lacuna positiva no Orbital Molecular Ocupado Mais Alto (Highest Occupied Molecular Orbital – HOMO) e vão para o estado Orbital Molecular Ocupado Mais Baixo (Lowest Unoccupied Molecular Orbital – LUMO), e então são injetados na banda de condução do TiO_2 ;
- Os elétrons inseridos na banda de condução do TiO_2 são guiados até o TCO através do mecanismo de difusão entre as partículas. Esse mecanismo permite que os elétrons pulem de uma partícula a outra de TiO_2 . Ao alcançarem o TCO, saem para fiação externa conectada na célula;

- O processo de excitação de elétrons deixa buracos de carga nas moléculas de corante, que são preenchidas por íons livres de iodo I^- oriundos do eletrólito, e que são convertidos em triiodetos I_3^- ;
- De maneira análoga, o processo inverso ocorre no eletrodo positivo, quando íons I^- do eletrólito captam elétrons transferidos do TiO_2 que estão acumulando sobre o filme de Pt do CE. As moléculas do corante oxidado recebem os íons I^- que preenchem as lacunas geradas no TiO_2 , restaurando o estado fundamental do corante, dessa forma um ciclo é fechado, repetindo-se e dando continuidade à geração de corrente elétrica da célula solar;

O ciclo completo descrito acima pode ser observado na Figura 4. Uma das características de importância do processo é sua capacidade de gerar potência elétrica sem envolver transformações químicas (DUARTE, 2013).

Figura 4 – Diagrama do ciclo de funcionamento de uma DSSC.



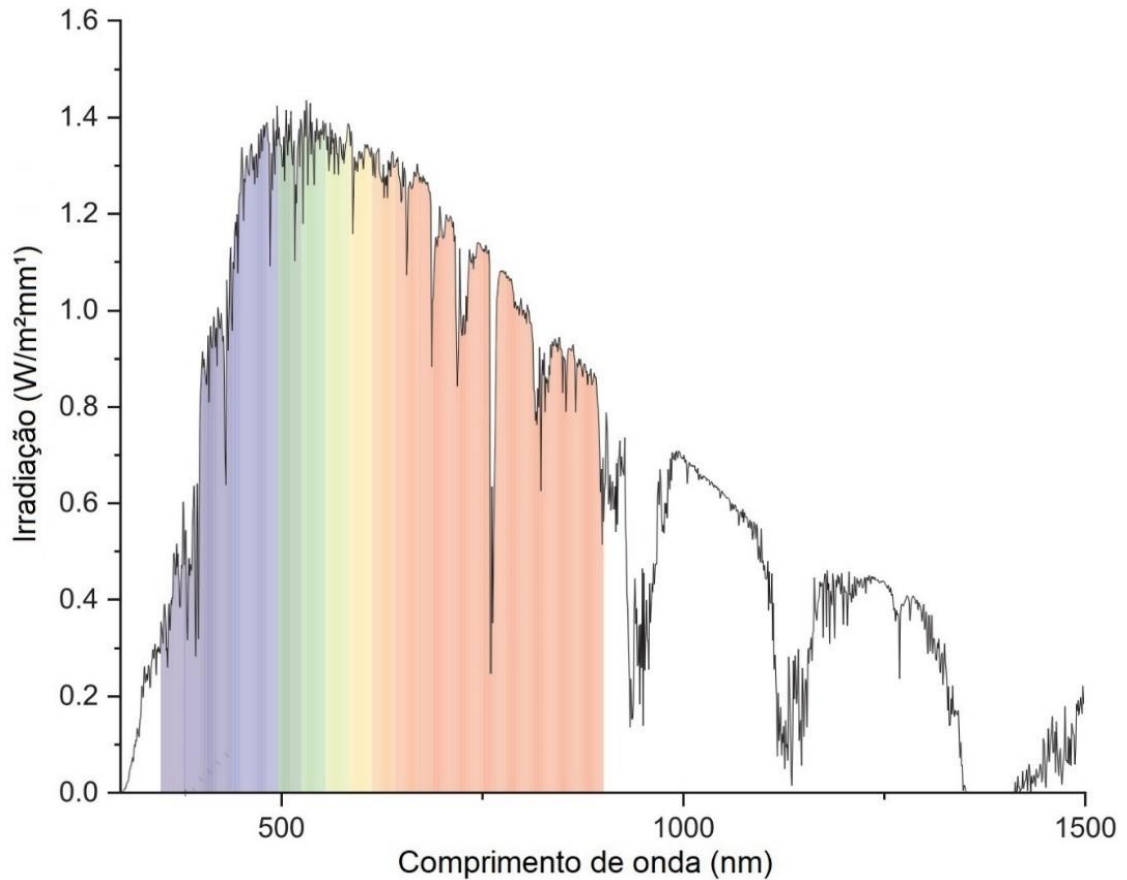
Fonte: Agnaldo et al. (2006, p. 78).

Dessa forma, a diferença entre o HOMO do corante e o potencial redox do eletrólito determina a densidade de corrente produzida pela célula através do

mecanismo de difusão efetiva de elétrons (ARDO; MEYER, 2009). O mirtilo tem em sua constituição um composto que permite essa diferença em comparação à outras categorias de pigmentação de vegetais, a antocianina, que naturalmente possui grupos hidroxila e carbonila em sua composição capazes de se ligarem fortemente à superfície de um filme de TiO_2 , e permite a injeção de elétrons para banda de condução do TiO_2 (SAMPAIO, S., 2014; CALOGERO et al., 2012). Além disso, o composto possui capacidade de absorver uma parcela do espectro solar na região infravermelha e, principalmente, na luz visível.

O espectro solar fraciona a maior fonte energia que impacta a superfície da terra, e é demonstrado na Figura 5. O espectro solar abrange uma ampla faixa de comprimentos de onda, variando de 200 a 3200 nm. Essa faixa espectral inclui diferentes regiões, como o ultravioleta (UV) entre 200 e 400 nm, a faixa visível (VIS) entre 400 e 700 nm, e o infravermelho (IV), principalmente entre 700 e 1500 nm, como demonstrado na Figura 5. A parcela da radiação UV representa apenas 5% do espectro solar, enquanto a faixa visível é de 43% e a IV de 49% (GRIMM, 1999). É importante ressaltar como a parcela do espectro visível ocupa, em porcentagem, menos do que a IV, porém a faixa de comprimento de onda que abrange essa área é menor, logo, a parcela da energia que entra nessa região é muito concentrada. A partir dessa premissa, corantes com capacidade superior de absorver na região do visível tendem a ter destaque para aplicação de DSSCs.

Figura 5 – Espectro de luz solar.

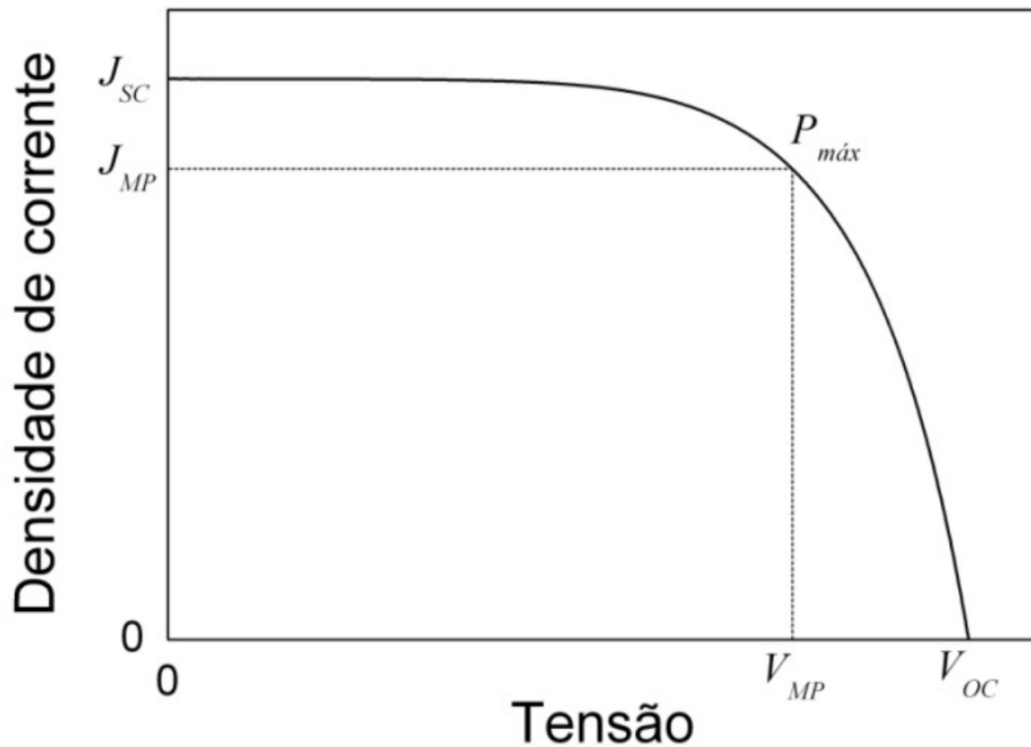


Fonte: Adaptado de Grifoni et al. (2021, p.2).

2.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS CÉLULAS SOLARES

As propriedades das células solares podem ser determinadas pela obtenção de valores de corrente e tensão do dispositivo. A Figura 6 ilustra o perfil de uma curva corrente-tensão típica do dispositivo, que pode ser representada em função da corrente elétrica ou em função da densidade de corrente elétrica. A curva em função da corrente elétrica quantifica apenas uma célula de área única e permite apenas a comparação entre células de mesmo tamanho, porém a análise em função da densidade de corrente permite generalizar o resultado da corrente gerada por unidade de área, facilitando a comparação com células solares de qualquer tamanho. Para obter valores em função da densidade de corrente, basta dividir a corrente elétrica da célula pela sua área útil de absorção de radiação solar.

Figura 6 – Curva característica da densidade de corrente em função tensão elétrica para uma célula solar.



Fonte: Duarte (2013, p. 50).

A corrente elétrica quando a tensão é zero é chamada de corrente em curto-circuito, e sua magnitude define o maior valor de corrente produzido pela célula, representada pela densidade de corrente J_{sc} na Figura 6, e sua medição é feita por meio do contato elétrico entre os dois eletrodos com auxílio de um amperímetro. A maior tensão elétrica medida pela célula é chamada de tensão em circuito aberto, representado por V_{oc} na Figura 6, e não existe corrente elétrica nesta condição, pois na prática, os eletrodos da célula não estão conectados entre si.

Os valores intermediários de corrente e tensão são medidos com auxílio de um potenciômetro, cuja resistência está compreendida numa faixa de valores que permite a construção da curva entre os valores de corrente em curto-circuito até tensão em circuito aberto. O produto entre a densidade de corrente a tensão fornece a potência gerada pela célula naquela condição de operação, dada em W/m^2 , e entre esses valores intermediários, existe um ponto em que a potência é máxima, evidenciado por $P_{m\acute{a}x}$.

Outro parâmetro fundamental é o Fator de Preenchimento (Fill Factor – FF), dado pela Equação 6. O FF é um valor compreendido entre zero e um e representa uma razão entre duas áreas retangulares na curva corrente por tensão, sendo a comparação da área menor, dada pela potência máxima no produto $J_{MP}V_{MP}$ e a área maior dada pela potência idealizada da célula, dada pelo produto $J_{sc}V_{oc}$. Quanto mais próximo de um for o FF, mais eficiente é a célula, enquanto valores próximos de zero indicam menor eficiência (POURANDARJANI; NASIRPOURI, 2019).

$$FF = \frac{J_{MP}V_{MP}}{J_{sc}V_{oc}} \quad (6)$$

A eficiência global da célula η , dada na Equação 7, apresenta a razão entre a densidade de potência máxima gerada pelo dispositivo e a densidade de potência da radiação incidente, que é definida entre zero e cem por cento. Esta equação calcula o percentual de energia solar que foi convertida em energia elétrica (DUARTE, 2013).

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{I_s} \cdot 100 \quad (7)$$

Esse parâmetro em conjunto com o FF, V_{oc} e J_{sc} são um dos principais critérios comparativos entre células solares, pois permitem avaliar a célula como um todo, e testar impactos de diferentes processos de construção, ensaios com novos materiais e análises de estabilidade, uma vez que mudanças na célula solar impactam diretamente todos esses parâmetros.

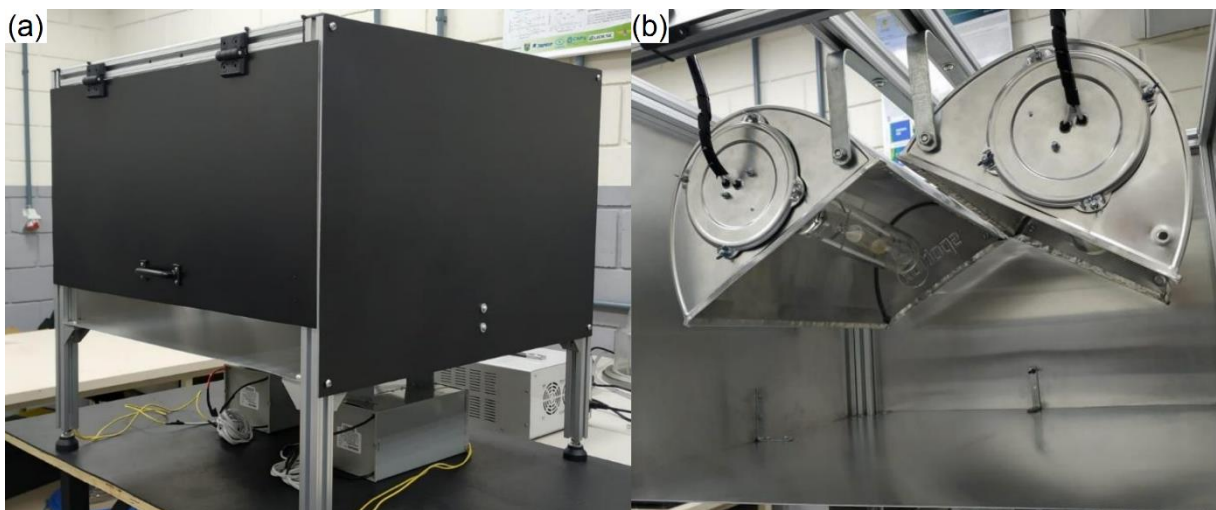
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e procedimentos adotados para confecção das células solares sensibilizadas por corante e obtenção de dados. Além disso, apresenta-se a adaptação realizada no simulador solar que se encontra no Laboratório de Tratamento de Superfícies (LaTS), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), para as condições de operação das células.

3.1. MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PARA O SIMULADOR SOLAR

O simulador solar para o padrão AM1.5 projetado e construído por Janstch (2022) é visto na Figura 7. O simulador apresenta características importantes, como irradiação média de 1000 W/m^2 numa área de $40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ após a estabilização das lâmpadas de vapor metálico Philips HPI-T 1000W (Anexo A), que ocorre após aproximadamente sete minutos (JANSTCH, 2022).

Figura 7 – Simulador solar com (a) tampa fechada (b) refletores instaladas



Fonte: Janstch (2022, p. 31).

Além disso, o projeto se enquadra na NBR 11879:1991 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Segundo a classificação, o projeto obteve

Classe B para Casamento espectral, e Classe C para Uniformidade da radiação e Estabilidade conforme os requisitos de desempenho de simuladores solares definidos pela ABNT (1991), expostos na Tabela 1 (JANSTCH, 2022).

Tabela 1 – Classificação de simuladores solares pela NBR 11879 da ABNT

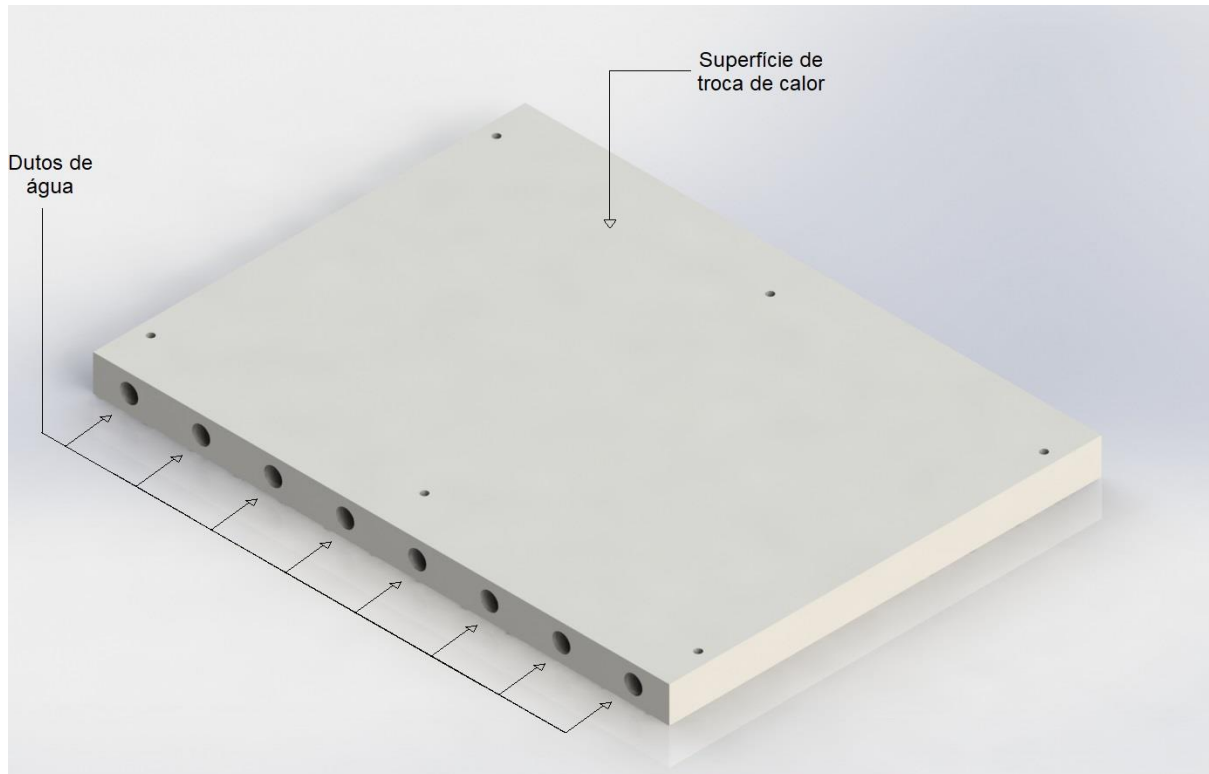
Característica	Classe A	Classe B	Classe C
Uniformidade da radiação	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Estabilidade temporal	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 40\%$	$\leq \pm 100\%$ e -60%

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

Apesar do feito, a estrutura gera temperaturas de até 70 °C na mesa de testes, e devido à necessidade de operação em temperatura ambiente do padrão AM1.5 (~25 °C), a temperatura do equipamento não permite a caracterização adequada dos dispositivos solares, principalmente, células de junção sólido-líquido, como a DSSC, devido à evaporação da solução eletrolítica e o aumento da resistência elétrica interna do dispositivo que provoca a redução do VOC (MAÇAIRA, 2015). Ademais, as elevadas temperaturas também podem danificar a estabilidade de corantes orgânicos, como o mirtilo.

Para corrigir a temperatura no interior do simulador solar, adaptou-se o projeto com a adição de módulos de refrigeração afim de dissipar parte do calor gerado pelas lâmpadas. Para isso foi projetado um bloco de refrigeração de água de 40 cm x 30 cm atentando-se à área efetiva de irradiação proposta pelo simulador de 40 cm x 20 cm (JANSTCH, 2022) e à área ocupada pelas células solares, com objetivo de diminuir a temperatura sobre a célula, como demonstrado na Figura 8.

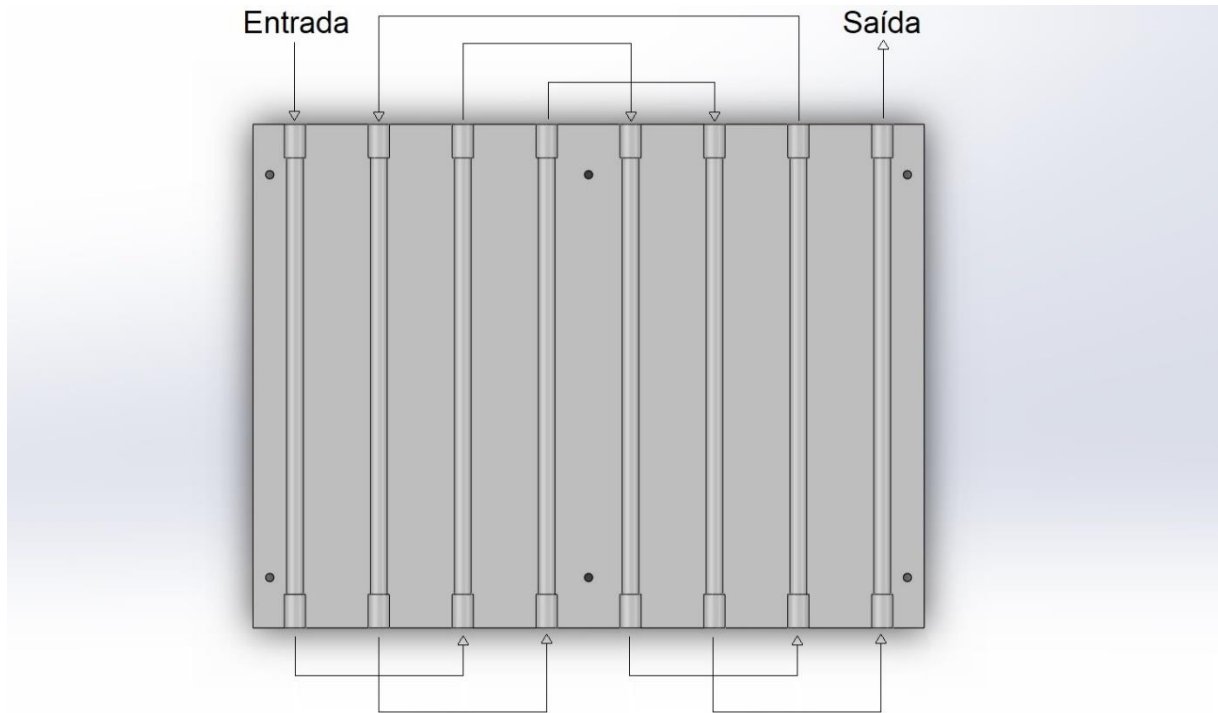
Figura 8 – Perspectiva isométrica do bloco de refrigeração sem conexões.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Os tubos passantes na estrutura do simulador solar são responsáveis pela troca de calor entre o simulador com auxílio da passagem do líquido. O dimensionamento dos tubos ocorreu através das considerações fundamentadas no tópico de escoamentos internos, e propõe-se para modelagem a condição de contorno de temperatura constante na superfície, propriedades tomadas à temperatura média, e estrutura isenta de convecção natural. Devido ao seu funcionamento de água circulando em um circuito com diversas curvas de 180°, o modelo exige a análise de escoamento na condição de região de entrada fluidodinâmica, já que os orifícios passantes são considerados de baixo comprimento. Além disso, as curvas são feitas externamente ao bloco através de mangueiras conectadas a engates rápidos, pois a ausência de curvas internas facilita a usinagem. O circuito da água é demonstrado pela Figura 9. A escolha do circuito de água é devido à limitação geométrica das mangueiras e engates, que não possibilitam a conexão ao duto imediatamente ao lado devido a pequena distância.

Figura 9 – Área de seção reta do bloco de refrigeração



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A modelagem em python do problema (Apêndice A) é feita a partir das Equações 1 a 5, utilizando como dados de entrada os dados geométricos do bloco tais como largura, comprimento, número de furos e diâmetro dos furos, além de propriedades térmicas dos materiais envolvidos, como o alumínio utilizado na usinagem do bloco e o líquido refrigerador, entre outros. Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 2.

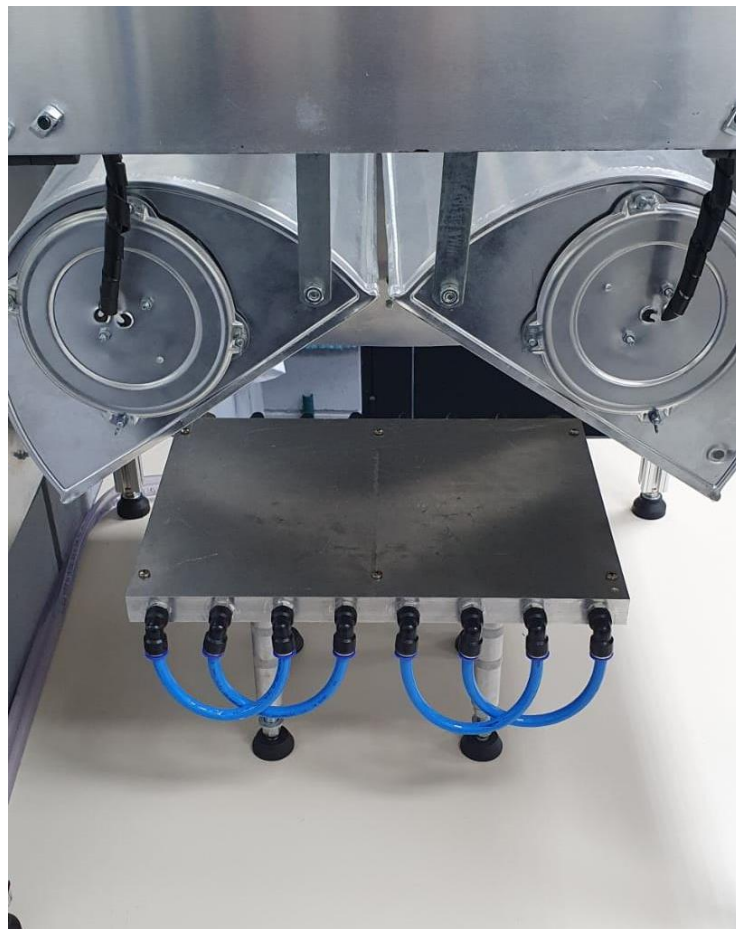
Tabela 2 – Resultados da modelagem.

Definição	Valores
Número de Nusselt	6,3
Coefficiente de Transferência de Calor	389,2 W/m ² K
Temperatura de Superfície do Bloco	36,4 °C

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O bloco foi construído em alumínio naval; as conexões são do tipo engate rápido de 10 mm, e há duas principais mangueiras conectadas que vão até o sistema de alimentação escolhida. Dessa premissa, o simulador solar está pronto para ser utilizado para aplicações de DSSCs em condição AM1.5; além disso, quatro apoios ajustáveis foram encaixados como suporte ao bloco para ajustar a altura da mesa e manter a irradiação de 100 mW/cm^2 do simulador solar, como apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Estrutura montada do bloco de refrigeração.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Para melhoria de troca de calor, uma fina camada de pasta térmica Thermal Silver® é depositada entre as superfícies das células e da mesa. Posteriormente, foi retirado a chapa de alumínio da parte inferior do simulador solar, de forma que a célula entre em contato diretamente com o bloco refrigerador. Com a estrutura funcional, a fase de construção das células solares para análise é iniciada.

3.2. CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE

Neste tópico é apresentada as etapas de fabricação dos componentes que englobam as DSSCs com base nos fundamentos apresentados entorno da Figura 3. As etapas foram executadas com a seguinte cronologia: (i) fabricação do eletrodo de trabalho (WE); (ii) fabricação dos contra eletrodos; (iii) finalização da célula com as etapas de selagem por filme termoplástico e inserção de eletrólito líquido.

3.2.1. Eletrodo de Trabalho (WE)

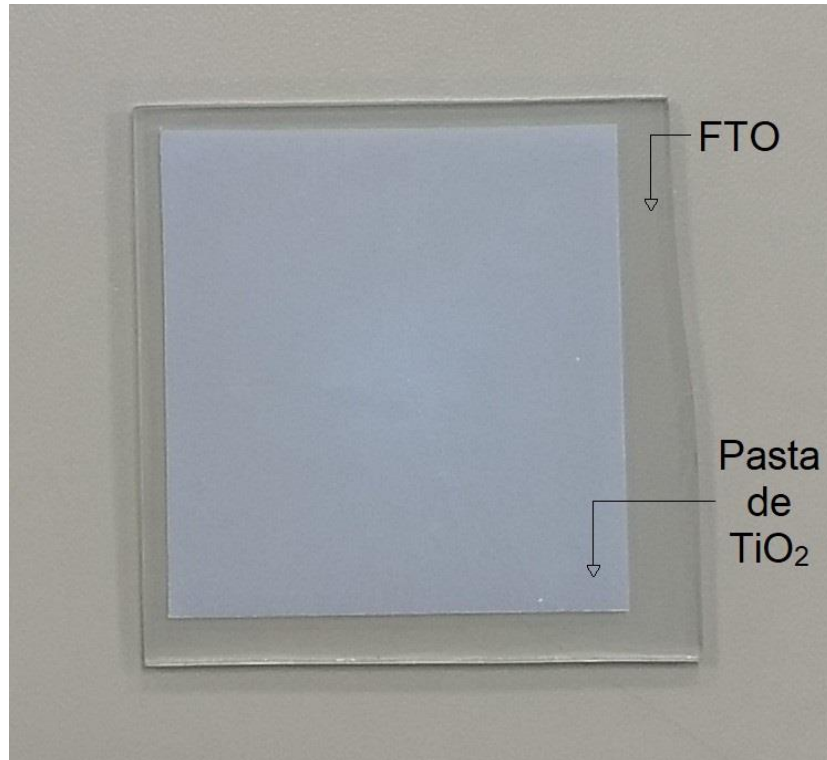
Para esta pesquisa foram construídas duas DSSCs com a geometria de dois eletrodos planos e fechamento no formato de sanduíche. Os eletrodos de trabalho foram fabricados sobre os TCOs da empresa Solaronix, e são compostos por uma lâmina de vidro comum com área esperada de 5 cm x 5 cm e espessura de 2,2 mm. Os TCOs são recobertos por um filme fino de dióxido de estanho dopado com flúor (FTO) com resistência de folha de 7 Ω /square. O TCO tem transparência média de 80% entre o espectro visível de 400 a 700 nm segundo a fabricante.

O filme nanoporoso de TiO_2 foi depositado sobre o eletrodo de trabalho por meio da técnica spin coating, que consiste na deposição da pasta de TiO_2 sobre uma área delimitada por fita no TCO, e uniformizada com a ação da força centrífuga gerada por uma máquina rotatória de alta velocidade, em torno de 5000 rpm. Após devidamente distribuída sobre a superfície do substrato, a pasta é aquecida em 500°C durante 10 minutos para formação do filme poroso, e seu resfriamento é natural dentro do forno para não ocorrência de choque térmico no eletrodo de vidro. A pasta foi adaptada e produzida a partir da metodologia descrita por Ramade (2022):

- Adição de 3 g de TiO_2 (P25 Evonik), 0,9 g de polietilenoglicol (PEG) 20.000 (considerando 30% em massa de TiO_2), 7 ml de água destilada e 100 μl de acetilacetona em um almofariz;
- Maceração lenta e com baixa pressão do composto por cerca de 30 minutos, com adição de 3 ml de água (adição feita de 1 em 1 mililitro);
- Adição de 100 μl de Triton-X (surfactante) e maceração lenta até a obtenção da viscosidade desejada;
- Deposição da pasta sobre o eletrodo de trabalho. O resultado da deposição sobre o TCO é apresentado na Figura 11.

Ambos os eletrodos de trabalho foram sensibilizados com corantes, um sintético e um orgânico para comparação. Para o sintético, o eletrodo foi sensibilizado por corante à base de rutênio com nome de Ruthenizer 535 (cis-diisothiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid) ruthenium(II)) adquirido da empresa Solaronix.

Figura 11 – Eletrodo de trabalho após a deposição de TiO_2 .



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O corante de rutênio é obtido na fase sólida e deve ser diluído para uso, assim, a sugestão para as soluções de imersão do WE e anexação do corante é da diluição do corante sólido em álcool anidro (0,2% de água) para formação de mistura saturada com auxílio de equipamento de ultrassom por 10 minutos. Porém, foi utilizado uma mistura supersaturada de rutênio em álcool isopropílico que possuía particulados sólidos de corante não diluído que anexaram ao eletrodo, e sua retirada pode danificar a interface do eletrodo.

O corante orgânico de mirtilo foi produzido a partir de uma solução 1:1 de mirtilos e álcool isopropílico. Para sua confecção, cada mirtilo foi cortado ao meio com auxílio de pinça e tesoura, para minimizar a liberação do suco da fruta por trituração. A solução com álcool e mirtilos é aquecida a 45 °C no agitador magnético enquanto

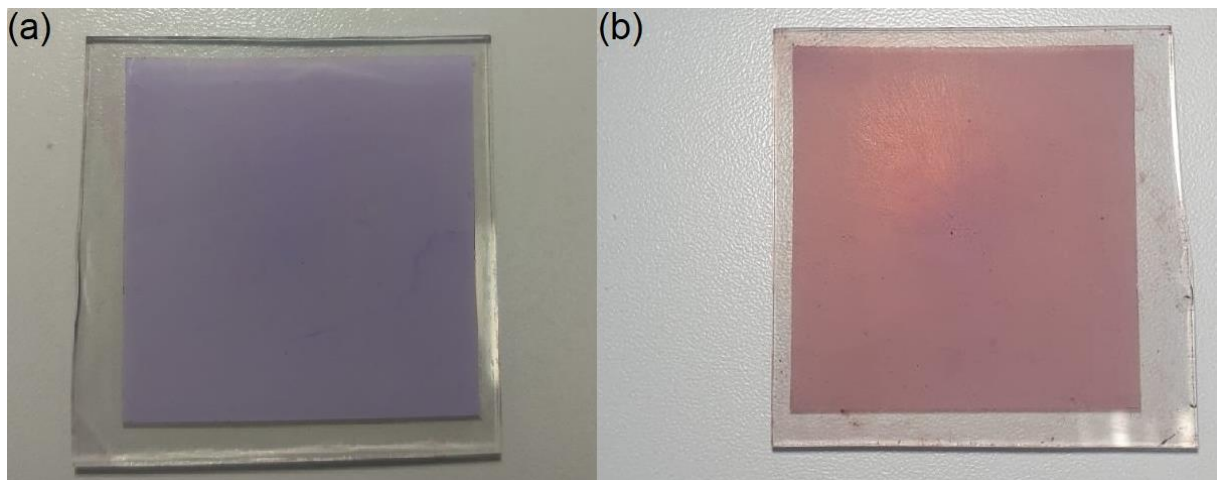
misturada com o agitador magnético operando em 90 rpm. A solução foi armazenada em ambiente refrigerado para evitar a degradação em curto prazo.

A espectrofotometria permite a medição de absorbância de luz do corante, porém esse valor altera com a oxidação do corante da fruta. Portanto, para garantir que o corante da fruta não oxidou, medidas de espectrofotometria óptica foram realizadas, afim de garantir que não houve mudanças na absorbância do corante orgânico. Para as medições, os corantes foram postos em cubetas de quartzo e expostos ao espectrofotômetro IL-592-LC da marca KASUAKI, que permite leituras entre 200 nm e 1000 nm. Os valores de absorbância foram medidos com intervalo de uma semana, e resultaram em uma absorbância de 1,62 assim que a solução foi produzida e 1,66 logo que o eletrodo foi sensibilizado, ambos considerados numa região de pico no comprimento de onda de 570 nm. Como erro da diferença é de cerca de 2%, confirma-se a estabilidade do corante durante o processo de sensibilização do eletrodo.

Para todos os eletrodos de trabalho sensibilizados, o procedimento foi realizado da seguinte forma:

- Armazenamento em recipiente fechado por, no mínimo, 24 horas para sensibilização do TiO_2 ;
- Enxágue do eletrodo com álcool anidro após o processo de sensibilização;
- Secagem com ar quente. A Figura 12 apresenta o WE após a sensibilização.

Figura 12 – Eletrodos de trabalho sensibilizados com solução de (a) rutênio e (b) mirtilo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Para armazenamento, os WE são, geralmente, armazenados numa câmara de vácuo para reduzir o contato com ar e possíveis contaminações ou reações químicas sobre sua superfície. O WE será o eletrodo que receberá diretamente a irradiação das lâmpadas do simulador solar, porém ainda é necessário produzir o contra eletrodo para fechar o circuito de troca de cargas elétricas dentro da célula, uma vez que o WE não produz corrente elétrica sem a sua contraparte.

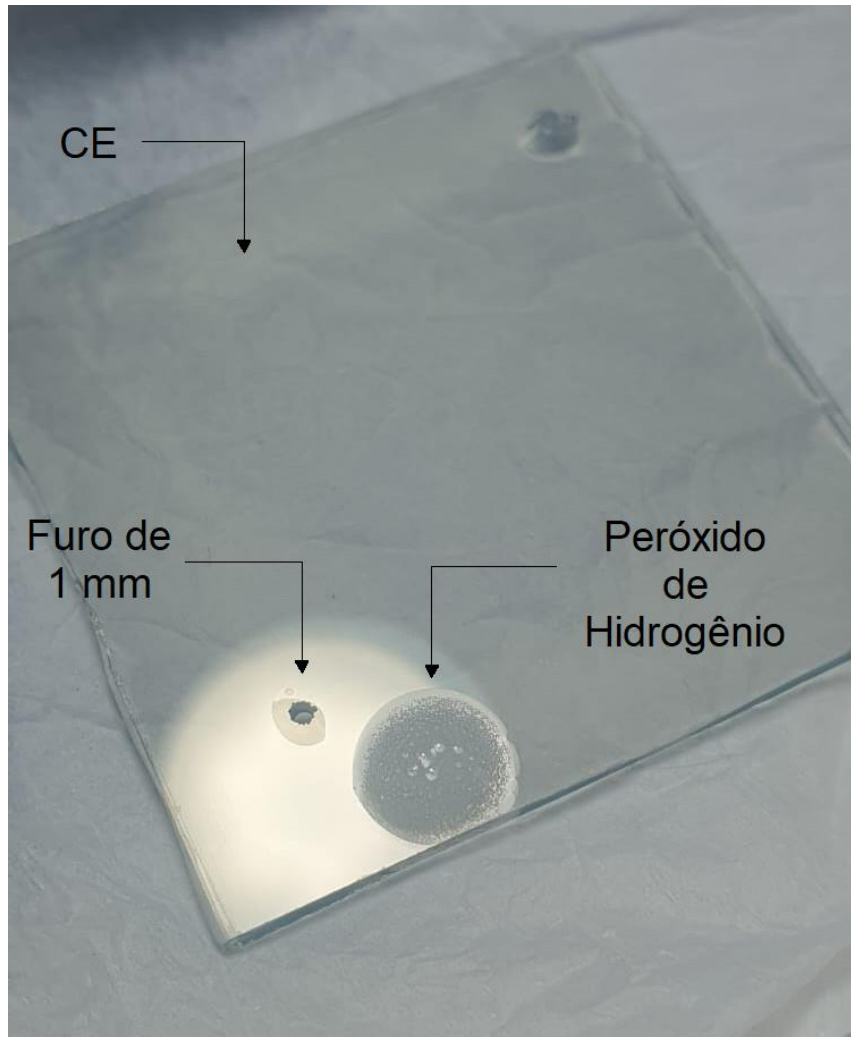
3.2.2. Contra Eletrodo (CE)

Para produção do contra eletrodo foi utilizada outra lâmina de TCO com as mesmas características da utilizada na produção do WE. A lâmina foi cortada com dimensão de 5 cm x 5 cm, assim como a dimensão utilizada para o WE. A limpeza dos TCOs foi realizada com auxílio de enxágues de água deionizada e limpeza de superfície com detergente neutro.

O vidro foi cortado na mesma dimensão do WE. Em seguida, suas bordas foram lixadas e a superfície limpa com água deionizada e detergente neutro. Antes da deposição do catalisador, foram realizados dois furos de 1 mm com brocas de carboneto de tungstênio para permitir a injeção da solução eletrolítica após a selagem do CE com o WE (MARTINEAU, 2012). Dada a complexidade de realizar o furo sem danificar o eletrodo, a perfuração é dividida em duas partes, perfurando um furo de 1 mm até a metade do eletrodo pelo lado não condutor, e depois é feito o furo pelo lado condutor até torná-lo passante (DUARTE, 2013; MARTINEAU, 2012). Esse procedimento é realizado com a lâmina de vidro submersa em água deionizada devido à fragilidade da broca e do vidro. Ainda assim, houve processo de trinca em uma das células, que contribuiu com a ineficácia da selagem da célula posteriormente.

Com o TCO furado, a finalização do CE é realizada com a deposição de um elemento catalítico, no caso, utilizou-se Platisol T, uma tinta líquida de platina também adquirida da empresa Solaronix. A solução é espalhada com auxílio da técnica spin coating, porém em velocidade reduzida comparada com a pasta de TiO_2 devido à baixa viscosidade da solução, em torno de 1000 rpm. Em seguida, o CE é sinterizado em 450 °C durante 10 minutos (DUARTE, 2013). A atividade catalítica do filme de platina pode ser verificada com peróxido de hidrogênio, que evapora ao entrar em contato com a superfície em temperatura ambiente, apresentando a formação de bolhas, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Verificação da atividade catalítica do CE.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

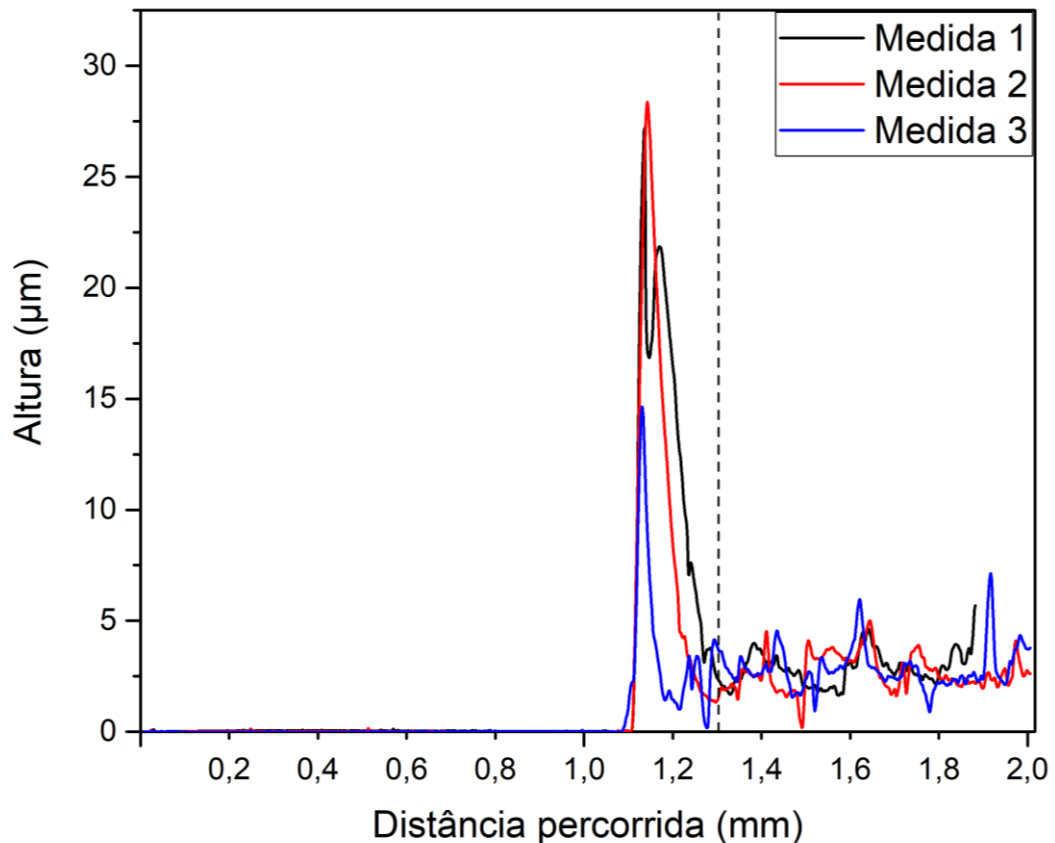
3.2.3. Finalização da Célula

Por fim, os eletrodos são unidos e selados com folhas termoplásticas de 25 μm de espessura, de forma que seu corte tenha formato retangular, na dimensão das bordas dos filmes de TiO_2 . Porém, devido a incerteza da espessura do filme de TiO_2 obtido, uma análise de perfilometria foi feita para determinar a quantidade de folhas termoplásticas que deveriam ser usadas.

A Figura 14 apresenta três medições de perfilometria por contato. Para a análise de perfilometria, deve-se garantir uma área sem aplicação de filme para que o equipamento varra a diferença de alturas. Para tal propósito, é delimitado a área de aplicação do filme por spin coating com auxílio de fitas, que impedem a deposição de filme em uma determinada área. O barramento por fita causa picos de altura nas

bordas do filme devido ao acúmulo de pasta nas laterais da fita, causadas pela força centrífuga do método de spin coating, portanto, os picos podem ser desconsiderados para análise de espessura média, mas não devem ser desconsiderados quanto à altura em relação aos filmes termoplásticos. O fenômeno descrito pode ser evidenciado pela Figura 14, com valores de espessura até cerca de 30 μm , porém, a média da espessura do filme é feita apenas depois da descida, após cerca de 1,3 mm percorridos pelo sensor após o início da varredura. A espessura média tem valor 3,1 μm , e o desvio-padrão de 0,6 μm .

Figura 14 – Perfilometria dos filmes produzidos de TiO_2 .



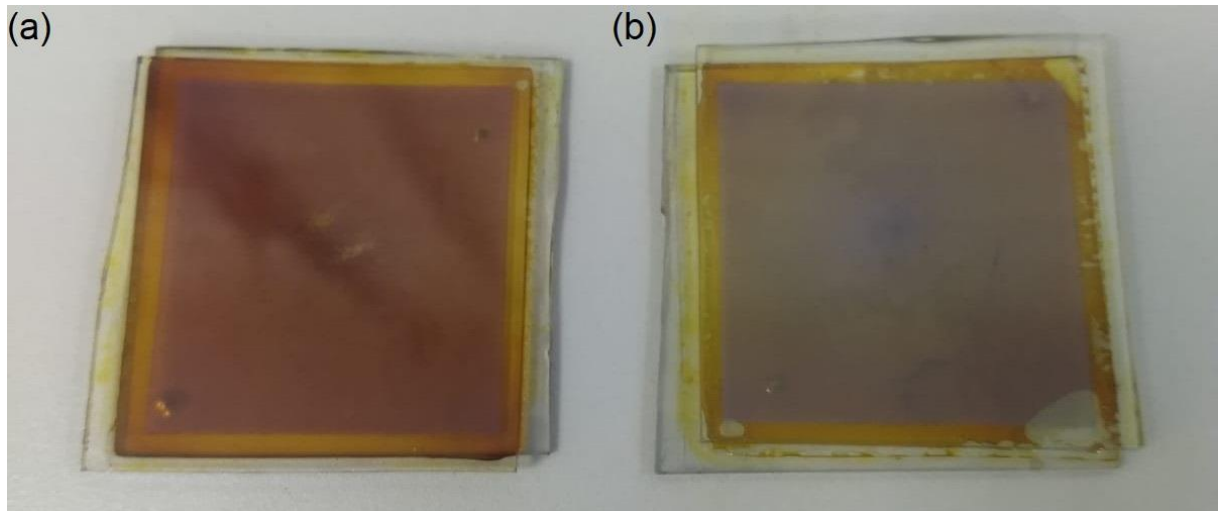
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Devido à espessura máxima do filme ser superior à espessura de uma folha termoplástica, ambos os eletrodos das células foram pressionados contra duas folhas empilhadas a 130 $^{\circ}\text{C}$ para realização da selagem da célula. Além disso, a obtenção da área real de cada célula é um procedimento fundamental, pois permite encontrar os valores de densidade de corrente, valor esse que independe a área da célula e pode ser usado como base comparativa com outros trabalhos. Portanto, a área útil

das células não é dada pelas lâminas de 25 cm² como um todo, e após selagem foi medido a área efetiva de cada uma. A célula à base de rutênio tem área útil de 4,25 cm x 4,20 cm = 17,9 cm², e a célula à base de mirtilo com área de 4,25 cm x 4,05 cm = 17,2 cm².

Após a selagem dos eletrodos, o eletrólito Iodolyte Z-50, da empresa Solaronix, é injetado através de um dos furos com auxílio de uma micropipeta, de forma que o outro furo permita a saída do ar à medida que o eletrólito preenche o espaço entre os eletrodos (BRAGA, 2012). Além disso, o excesso de eletrólito é retirado para evitar perdas elétricas. As DSSCs finalizadas são apresentadas na Figura 15.

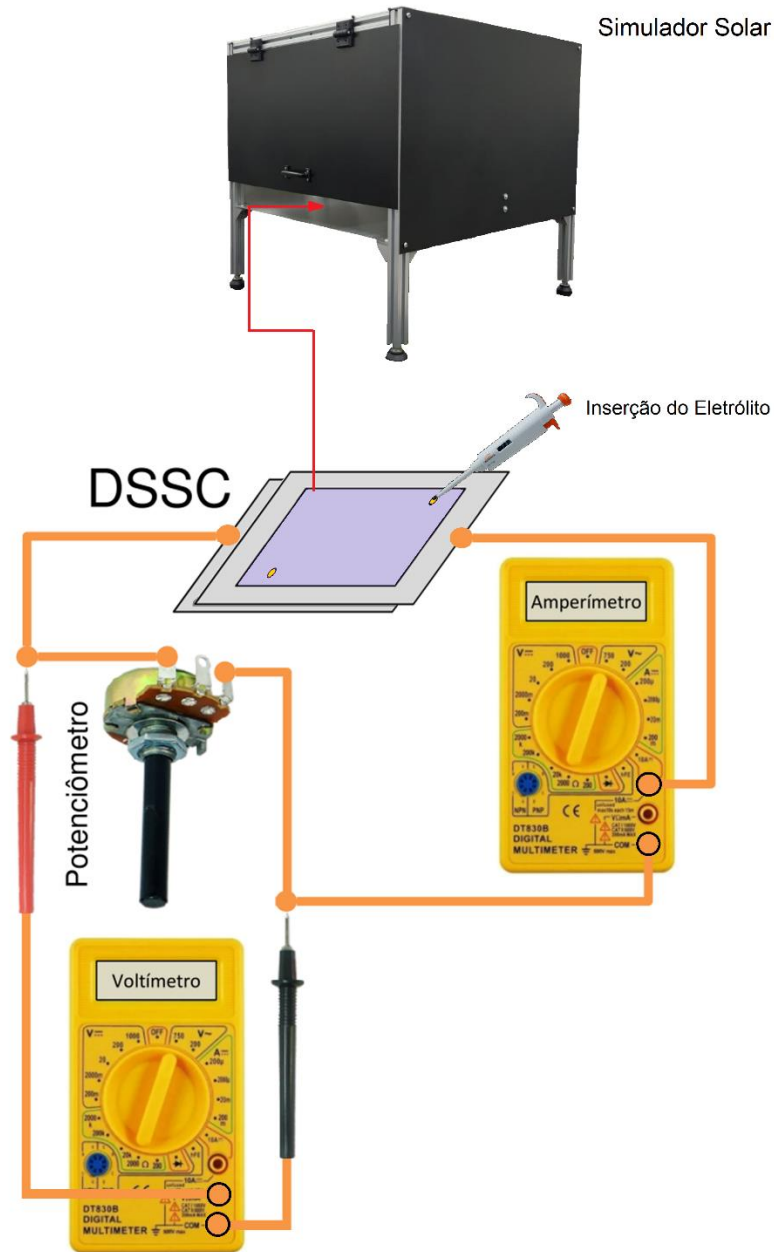
Figura 15 – DSSCs produzidas com (a) rutênio e (b) mirtilo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Com isso, as células estão operantes e partem para a etapa de coleta de dados relacionados ao seu funcionamento. Para a coleta de dados das células solares, equipamentos como amperímetro, voltímetro e potenciômetro são necessários, sendo que o potenciômetro, caso usado, deve estar em paralelo ao voltímetro, como demonstrado pelo esquema da Figura 16. Os valores de corrente são divididos pela área das respectivas células para permitir a padronização da análise da célula com as demais da literatura, que podem ter área variada. Quanto a esse trabalho, a curva corrente tensão não foi coletada, e apenas os valores de tensão em circuito aberto e corrente em curto-circuito foram medidos, dispensando o uso de potenciômetro.

Figura 16 – Ilustração de um circuito elétrico utilizado para medição das curvas corrente-tensão.



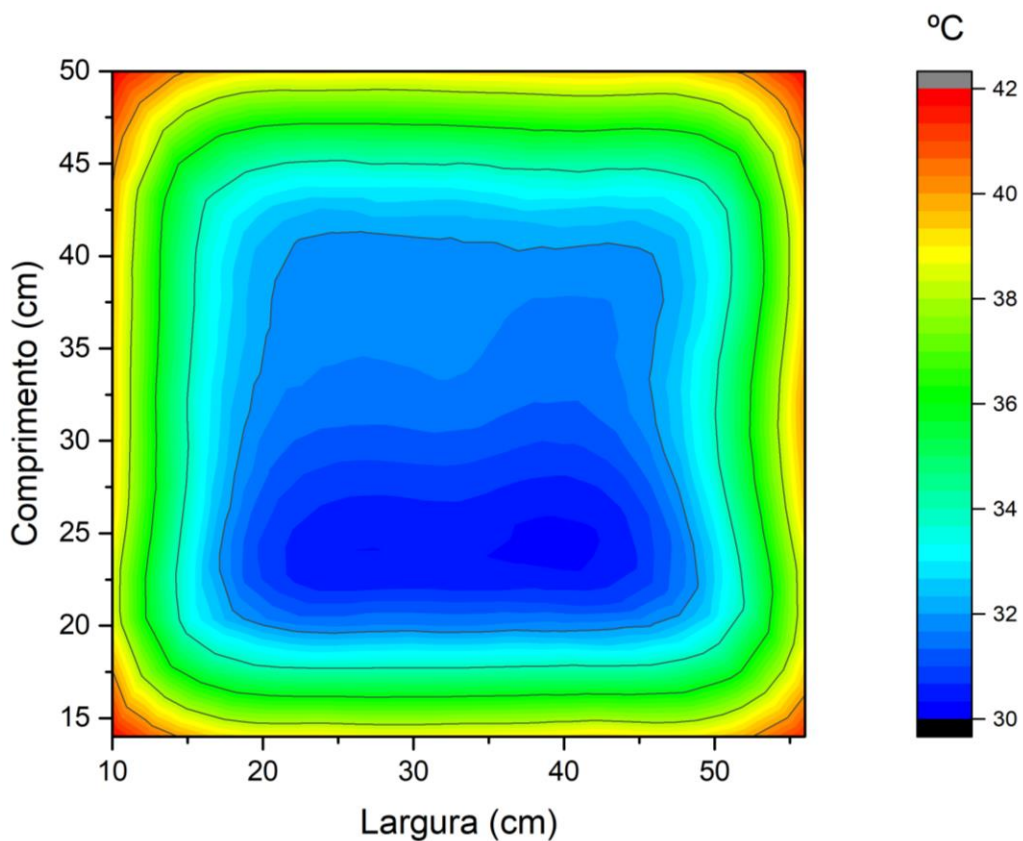
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Durante as medições, as DSSCs foram mantidas refrigeradas com água através do bloco de refrigeração desenvolvido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medidas de temperatura do simulador solar, com a adição do bloco de refrigeração, foram feitas com intuito de validar o critério de temperatura de operação das DSSCs no padrão AM1.5. Devido à ausência de um chiller, foi utilizada água corrente em circuito aberto como líquido refrigerador do bloco, em temperatura ambiente e vazão média de 4,5 L/min. O mapeamento de calor após a instalação e operação do módulo de refrigeração é apresentado na Figura 17. A coleta de valores foi feita com auxílio de um termopar.

Figura 17 – Mapa de calor da temperatura no interior do simulador solar resfriado.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Durante os testes com a chapa inferior de alumínio do simulador solar, a mesa atingiu temperaturas mínimas de até 30 °C na região central do simulador solar, coincidente com a área do bloco de refrigeração. A irradiância de 1000 W/m² é compreendida em uma área central de 40 cm por 20 cm (JANTSCH, 2022), enquanto o sistema de refrigeração tem área de melhor desempenho na região central de 40

cm de largura e 30 cm de comprimento. Em comparação, a modelagem (Apêndice A) apontou uma temperatura na superfície de 36,4 °C, valor maior que o medido experimentalmente.

Portanto, o sistema satisfaz o propósito de regular a temperatura e alcançar nível operacional para caracterização de células solares na área delimitada. Além disso, para melhorar ainda mais sua performance, a chapa inferior de alumínio do simulador solar foi retirada para aumentar a taxa de dissipação das células solares, utilizando a própria estrutura do bloco como apoio das células com pasta térmica. A retirada da parte inferior do simulador encurta o caminho da troca de calor entre a célula e o bloco refrigerante, e teve como objetivo de reduzir a temperatura ainda mais do que as apresentadas na Figura 17.

Como os apoios da estrutura são reguláveis, o bloco foi regulado para a mesma altura da base do simulador solar, que foi retirada, para que não houvesse diferença nos valores de irradiação, pois esse parâmetro é afetado pela distância da lâmpada (CIPRIANI; DUARTE; BRAGA, 2021). Além disso, a modelagem (Apêndice A) possui capacidade de dimensionar o bloco para uso auxiliado de um chiller ao trocar os parâmetros do líquido no programa. Esse equipamento refrigera a água aquecida pelo simulador solar com auxílio de líquido refrigerante, em circuito fechado. Os principais parâmetros que um chiller industrial beneficiaria ao sistema é a maior vazão de água, de 10 L/min e a refrigeração da água auxiliada por gás refrigerante R-134a, comumente empregada para esse tipo de dispositivo.

Em seguida, as células são inseridas no simulador para obtenção de dados, e as propriedades elétricas medidas das células são dadas pela Tabela 3. Para comparação das células sensibilizadas por rutênio sintético, alguns valores da literatura são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Propriedades elétricas das células solares construídas.

Variáveis	Célula sensibilizada por rutênio	Célula sensibilizada por mirtilo
Tensão em circuito aberto (V_{oc})	840 mV	535 mV
Corrente em curto-circuito (I_{sc})	12,02 mA	2,40 mA
Área efetiva da célula	17,85 cm ²	17,21 cm ²
Densidade de corrente em curto-circuito (J_{sc})	0,67 mA/cm ²	0,14 mA/cm ²

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 4 – Síntese de resultados da literatura sobre propriedades elétricas de célula solares sensibilizadas por corante à base de rutênio.

Autor	Principais Características dos Métodos	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm²)	Área efetiva (cm²)
Govindraj et al. (2017)	Substrato de Titânio com nanotubos de TiO ₂ . Corante de rutênio N719.	647	13,64	0,25
Govindraj et al. (2017)	Pasta de TiO ₂ P25. Corante de rutênio N719	623	9,41	0,25
Nazeeruddin (2003)	Deposição de dupla camada de TiO ₂ por screen printing. Rutênio N719. Espessura de filme 12+4 μm.	750 ± 20	17,0 ± 0,5	0,50
Palomares (2002)	Pasta de TiO ₂ obtida por sol-gel. Filme de espessura 8 μm.	735	9,10	0,80
Palomares (2002)	Pasta de TiO ₂ obtida por sol-gel. Filme de espessura 4 μm.	710	5,00	0,80
Pourandarjani; Nasirpouri (2018)	Substrato de Titânio com nanotubos de TiO ₂ . Célula iluminada por trás. Corante de rutênio N719.	683	3,15	0,56

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Segundo Palomares et al. (2002), a espessura do filme tem alto impacto nas propriedades elétricas das células e por isso é comparado DSSCs de TiO₂ sensibilizadas por rutênio com espessuras de filme de 4 μm e 8 μm. Houve um aumento de densidade de corrente de 82% com a espessura duplicada. Para consistência de resultados, o autor desenvolveu no mínimo 7 células diferentes com a mesma pasta, e o erro porcentual entre os valores elétricos foi menor que 4%.

Devido à espessura das DSSCs apresentadas nesse trabalho terem média 3,1 μm, conforme a discussão dos dados de perfilometria da Figura 14, a literatura aponta que espessuras maiores aumentariam as propriedades elétricas de ambas as células produzidas (NAZEERUDDIN, 2003; PALOMARES et al., 2002), porém, a aplicação do método de spin coating nesse trabalho não foi realizada de maneira a garantir um controle efetivo da espessura, dependendo inteiramente da habilidade do operador do equipamento em definir o tempo, aceleração inicial e velocidade de

rotação do processo. Para controlar efetivamente a espessura do filme, seria necessário determinar a curva da espessura de filmes em função da velocidade de rotação do método, obtida a partir da análise de perfilometria de filmes depositados em diferentes velocidades. Além disso, para garantir reprodutibilidade, a viscosidade da pasta de TiO_2 necessitaria de análise por viscosímetro.

Um dos métodos que podem ser empregados e permite a deposição de filme de maneira controlada é o método doctor blade (GOVINDRAJ et al., 2017), que utiliza fitas de espessuras previamente conhecidas para delimitar uma área para deposição. A pasta é espalhada no interior dessa área, e a espessura do filme será correspondente à espessura da fita delimitador. Porém, sua desvantagem é a necessidade da perfeita delimitação por fita, pois acúmulos de bolhas de ar, dobras ou fitas empilhadas modificariam a espessura conhecida, e conseqüentemente, a espessura final da pasta depositada. Existem outros métodos de deposição estudados para deposição de filmes nesse ramo, tal como a deposição física de vapor por feixe de elétrons (Electron-beam physical vapor deposition - EBPVD) (KIM, Y. et al., 2012), deposição catódica ou Sputtering (CHANG; LO, 2010), além de suas variantes como DC Sputtering (DUARTE, 2013; KIM, H. et al., 2012) ou RF Sputtering (JIN et al., 2012).

As propriedades elétricas investigadas da célula sensibilizada por corante de rutênio apresentaram valores maiores que a média de tensão em circuito aberto e menores que a média para densidade de corrente em curto-circuito em relação às literaturas escolhidas, como demonstrado nas Tabela 3 e 4. Em relação à célula sensibilizada por corante mirtilo, devido à natureza do corante ser diferente, optou-se pela comparação das propriedades de células solares à outras células sensibilizadas de maneira semelhante. Para comparação das células sensibilizadas por mirtilo, alguns valores da literatura são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Síntese de resultados da literatura sobre propriedades elétricas de células solares sensibilizadas por corantes orgânicos.

Autor	Principais Características dos Métodos	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm²)	Área efetiva (cm²)
Chang; Lo (2010)	Deposição de TiO ₂ por sputtering. Corante à base de amora (antocianina)	555	1,89	0,25
Corrêa (2014)	TiO ₂ P25. Contra eletrodo de carbono. Corante à base de beterraba (betacianina)	30	0,042	4
Mounir; Ahmad (2012)	Pasta de TiO ₂ obtida por sol-gel. Corante à base de framboesa (antocianina). Contra eletrodo de platina	429	0,269	0,80
Mounir; Ahmad (2012)	Pasta de TiO ₂ obtida por sol-gel. Corante à base de uva (antocianina). Contra eletrodo de platina	340	0,091	0,50
Sampaio (2014)	Corante à base de Vinca-de-Madagáscar (antocianina).	140	0,43	1
Vinaayak et al. (2022)	Pasta de TiO ₂ P25 obtida por sol-gel. Corante à base de salgueiro-prímula (clorofila). Contra Eletrodo com filme de carbono retirado de lápis 6HB.	600	2,5	-

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

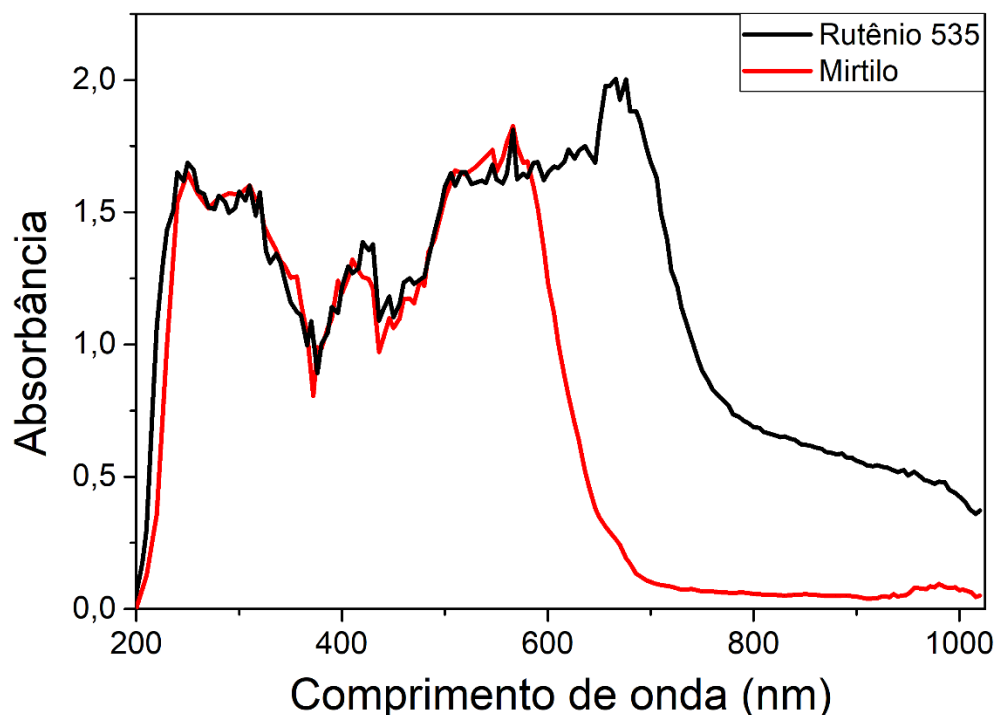
Os valores para célula solar sensibilizada pelo corante de mirtilo apresentaram valores na média quando comparados com outras células sensibilizadas por corantes naturais da literatura, com alto valor de tensão em circuito aberto e valores de corrente em curto-circuito na média, o que indica uma boa aplicação e estabilidade, porém, ainda inferior quando comparada à uma célula que foi sensibilizada por corante sintético.

Um dos motivos pelo qual os valores elétricos da célula sensibilizada pelo corante sintético serem superiores em relação às sensibilizadas por corante orgânico é o fato da natureza do desempenho fotovoltaico da célula solar ser altamente dependente da adsorção do corante específico utilizado (KUMARA et al., 2017), que para o corante orgânico à base de mirtilo, depende da concentração de antocianinas na sua composição.

Como o corante produzido não é composto apenas com essa substância de pigmentação para sensibilização da superfície do WE, outros complexos da fruta que não agregam às propriedades elétricas das células estão presentes, e a longa distância entre as moléculas do corante orgânico e seu ponto conectado à superfície do TiO_2 dificulta o transporte eficiente de elétrons (KABIR et al. 2022). A partir dessa premissa, a busca por métodos mais eficazes na extração do pigmento da fruta são desafios permanentes desse ramo científico.

O espectro de luz absorvido também impacta no desempenho da célula, porém, a pasta branca de TiO_2 não sensibilizado não é capaz de absorver grande faixa do espectro (ERENO, 2009). A Figura 18 traz os valores de absorbância para os corantes aplicados neste trabalho.

Figura 18 – Espectrofotometria dos corantes utilizados.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A quantidade total de energia absorvida é obtida através das áreas abaixo das curvas, e nota-se até o comprimento de onda de 600nm as curvas se comportam de maneira semelhante, porém, após esse valor, os valores de absorbância do corante à base de mirtilo decaem a quase zero, enquanto os valores do corante de rutênio decaem após o comprimento de 700nm, e ainda assim continuam com valores distanciados de zero. Isso acarreta numa maior absorção de luz e conseqüentemente, auxilia no fato da célula de rutênio apresentar valores superiores em termos de V_{oc} e J_{sc} quando comparada à célula de mirtilo.

O valor de tensão em circuito aberto da célula produzida é superior em comparação com alguns dados da literatura, como apontado na Tabela 4, porém os valores de densidade de corrente são inferiores. Isso pode ter ocorrido pois na prática, o processo de transferência de cargas dentro das células não é idealizado, e possui mecanismos extras que reduzem a carga gerada pela célula solar, tal como a corrente escura, que é um mecanismo de recombinação entre os elétrons e os buracos de carga criados no TiO_2 ou em regiões com ausência de dopagem por corante. Isso é devido ao fato de os elétrons serem injetados do corante para o semicondutor e as lacunas criadas serem injetadas do corante para o eletrólito, de forma que os elétrons presentes na banda de condução do TiO_2 possam difundir livremente de volta à solução eletrolítica (AGNALDO et al., 2006; ARAKAWA, 2003; DUARTE, 2013).

A corrente escura reduz a potência gerada pela célula por atuar como uma corrente que flui em sentido contrário, e sua magnitude depende diversos fatores que afetam a qualidade da interface, tais como a qualidade da pasta de TiO_2 e da qualidade da sinterização do corante (JEONG, 2020), além da quantidade de irradiação sobre a célula (CIPRIANI; DUARTE; BRAGA, 2021). Esse mecanismo é identificado como resistência shunt, que atua como uma resistência elétrica, e idealmente apresenta valor infinito, porém, na prática, baixos valores causam perdas de energia ao fornecer um caminho de corrente alternativo para a corrente gerada, agravado pelo tamanho da célula, e reduzindo a quantidade de corrente que flui através da DSSC. A corrente desviada é recombinada dentro da célula, e sua causa é principalmente por defeitos causados pela qualidade de manufatura (HONSBURG; BOWDEN, 2019).

A resistência em série é outra resistência que deve ser contabilizada. Idealmente seu valor é nulo, porém com valores acima de zero, há influência no mecanismo de transporte e recombinação, e envolve principalmente a movimentação

de corrente entre as interfaces dentro da célula, afetando diretamente valores de fill factor e corrente em curto-circuito (HONSBURG; BOWDEN, 2019). Segundo Liu et al. (2009), os valores da resistência em série sofrem alteração ao variar as propriedades elétricas do TCO, a espessura da camada de eletrólito líquido e a atividade catalítica do CE. A junção desses mecanismos pode ser uma justificativa para os baixos valores encontrados em comparação com a literatura.

Portanto, por mais que a densidade de corrente em curto-circuito seja um parâmetro que idealmente permite a comparação de resultados entre células de diferente tamanho, na prática sofre grande influência das resistências da célula causadas por defeitos de construção, anexação de corante, interface e tamanho. Por isso, um dos motivos de queda de performance é o tamanho efetivo da célula, que é cerca de 20 a 30 vezes a área empregada comumente na literatura (CHANG; LO, 2010; CORRÊA, 2010; GOVINDRAJ et al., 2017; MOUNIR; AHMAD, 2012; NAZZERUDDIN, 2003; PALOMARES, 2002; POURANDARJANI; NASIRPOURI, 2018; SAMPAIO, 2014), e sofre efeitos agravados relacionados às resistências. No entanto, a investigação de células de maior área apresenta a principal vantagem de se aproximar mais de células efetivamente utilizadas, uma vez que não é viável empregar efetivamente os baixos valores de corrente de células pequenas para conexão em sistemas elétricos ou outras aplicações práticas.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi construir e caracterizar células solares sensibilizadas por corante sintético e orgânico. Para isso, foi necessário projetar e construir um sistema de refrigeração para simulador solar, que, a partir do dimensionamento do sistema, resultou em um equipamento operacional que cumpriu com os requisitos solicitados ao apresentar resultados satisfatórios quanto a faixa de operação de células solares sensibilizadas por corante.

As células solares apresentaram valores satisfatórios em relação à literatura apresentada, em especial a sensibilizada por corante orgânico, porém foi conduzido estudos para indicar mecanismos que reduzem a eficiência das células bem como indicativos para melhoria de performance. Em suma, a investigação de células de maior área apresenta a principal vantagem de se aproximar mais de células efetivamente utilizadas, uma vez que não é viável empregar efetivamente os baixos valores de corrente de células pequenas para conexão em sistemas elétricos ou outras aplicações práticas.

Para trabalhos futuros, é reforçado o estímulo da comunidade científica em gradativamente aperfeiçoar o processo de construção da DSSC, como tipos de deposição, espessura dos filmes e camada de eletrólito, assim como o aperfeiçoamento da extração e estabilidade de corantes orgânicos. Quanto ao sistema de refrigeração, sugere-se futuramente a implementação de um chiller industrial que, além de contribuir com a melhoria de desempenho do sistema, seu circuito fechado evitaria o desperdício de água corrente.

REFERÊNCIAS

- AGNALDO, J. S. *et al.* Células solares de TiO₂ sensibilizado por corante. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 77-84, jul. 2006.
- ARAKAWA, H.; HARA, K., Current status of dye-sensitized solar cells. *In*: RAMAMURTHY, V.; SCHANZE, K. S. **Semiconductor photochemistry and photophysics**. New York: Marcel Dekker Inc, 2003. p. 123-171.
- ARAÚJO, R. S. *et al.* Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, p. 1-14, 29 ago. 2022.
- ARDO, S.; MEYER, G. J. Photodriven heterogeneous charge transfer with transition-metal compounds anchored to TiO₂ semiconductor surfaces. **Chemical Society Reviews**, v. 38, n. 1, p. 115-164, 2009.
- BRAGA, T. S. **Relatório de atividades**: estágio pesquisa (ff-601). São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2012. 25 p. [mimeo].
- BYRANVAND, M. Malekshahi *et al.* Electron Transfer in Dye-Sensitized Solar Cells. **Optoelectronics and Biomedical Materials**, v. 4, n. 3, p. 49-57, set. 2012.
- CALOGERO, G. *et al.* Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. **Solar Energy**, v. 86, n. 5, p. 1563-1575, mai. 2012.
- ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. **Transferência de calor e massa**: uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre: Mc Grall-hill, 2012.
- CHANG, H.; LO, Y. Pomegranate leaves and mulberry fruit as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1833-1837, out. 2010.
- CIPRIANI, A. A.; DUARTE, D. A.; BRAGA, T. S. Influência da intensidade de irradiação sobre as características elétricas de células solares sensibilizadas por corante. *In*: XIV ENCONTRO DE FÍSICA DO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. **Anais [...]** v. 1. p. 42-43, São José dos Campos, 2021.
- CORRÊA, C. J. A. **Fotorresposta de uma célula eletroquímica nanocristalina sensibilizada por corante a base de essência de beterraba**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- DUARTE, D. A. **Mecanismos de crescimento de filmes finos de N-TiO₂ por sputtering DC reativo e os efeitos da dopagem de TiO₂ no transporte de elétrons em células sensibilizadas por corante**. 2013. Tese (Doutorado em Física) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf. Acesso em: 9 out. 2022.

ERENO, D. Fotossíntese artificial. **Pesquisa Fapesp**, v. 156, p. 71–73, 2009.

GOLDEMBERG, J. *et al.* **Lighting the way**: toward a sustainable energy future. Amsterdam: Inter Academy Council, 2007. 174 p. Disponível em: https://www.interacademies.org/sites/default/files/publication/lighting_the_way.pdf Acesso em: 24 out. 2022.

GOVINDARAJ, R. *et al.* Fabrication of stable dye-sensitized solar cell with hydrothermally synthesized titanium dioxide nanorods as a photoanode material. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 5, p. 3736-3743, 29 nov. 2017.

GRIFONI, F. *et al.* Toward Sustainable, Colorless, and Transparent Photovoltaics: state of the art and perspectives for the development of selective near-infrared dye-sensitized solar cells. **Advanced Energy Materials**, v. 11, n. 43, p. 47, 8 ago. 2021.

GRIMM, A. M. Radiação solar e terrestre. **Balanco de Calor**. Curitiba, 1999. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-2.html>. Acesso em: 19 jun 2023.

HONSBURG, C.B.; BOWDEN S.G. **Photovoltaics education**, 2019. Disponível em: www.pveducation.org Acesso em: 1 jun. 2023.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 7. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JANTSCH, G. **Construção de um simulador solar para caracterização de células solares fotovoltaicas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Aeroespacial) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

JEONG, M. S. *et al.* Correlation between the open-circuit voltage and recombination loss at metal-silicon interfaces of crystalline silicon solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 210, p. 110519, jun. 2020.

JIN, Y. *et al.* The effect of RF-sputtered TiO₂ passivating layer on the performance of dye sensitized solar cells. **Ceramics International**, v. 38, p. 505-509, jan. 2012.

KABIR, F. *et al.* Instability of dye-sensitized solar cells using natural dyes and approaches to improving stability: An overview. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, v. 52, p. 9-9, ago. 2022.

KIM, H. *et al.* Improved performance of dye-sensitized solar cells with compact TiO₂ blocking layer prepared using low-temperature reactive ICP-assisted DC magnetron sputtering. **Journal of Industrial And Engineering Chemistry**, v. 18, n. 5, p. 1807-1812, set. 2012.

KIM, Y. *et al.* Fabrication of transparent conductive oxide-less dye-sensitized solar cells consisting of Ti electrodes by electron-beam evaporation process. **Thin Solid Films**, v. 520, n. 6, p. 2257-2260, jan. 2012.

KUMARA, N.T.R.N. *et al.* Recent progress and utilization of natural pigments in dye sensitized solar cells: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 301-317, out. 2017.

MAÇAIRA, J. *et al.* Role of temperature in the recombination reaction on dye-sensitized solar cells. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 17, n. 35, jul. 2015.

MARTINEAU, D. **Dye solar cells for real: the Assembly Guide for Making Your Own Solar Cells**. Solaronix, 2012. Disponível em: https://www.solaronix.com/documents/dye_solar_cells_for_real.pdf. Acesso em 12 nov. 2022

MOUNIR A.; AHMAD S. I.; A. W. D. Studying of natural dyes properties as photo-sensitizer for dye sensitized solar cells (dssc). **Journal of Electron Devices**, v. 16, IF-2, p. 1370-1383, 2012.

NAZEERUDDIN, M. K. *et al.* A swift dye uptake procedure for dye sensitized solar cells. **Chemistry Community**, n. 12, p. 1456-1457, 2003.

O'REGAN, B.; GRAETZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. **Nature**, v. 353, n. 6346, p. 737-740, 1991.

PALOMARES, E. *et al.* Control of Charge Recombination Dynamics in Dye Sensitized Solar Cells by the Use of Conformally Deposited Metal Oxide Blocking Layers. **Journal of The American Chemical Society** v. 125, n. 2, p. 475-482, 12 dez. 2002.

POURANDARJANI, A.; NASIRPOURI, F. A new approach to understanding the deficiency of backside illuminated dye-sensitized solar cell's fill factor as a result of cracking of the TNAs. **Proceedings of the Materials Today**, v. 18, p. 501-509, 2019.

RAMADE, A. M. **Deposição de filmes finos de dióxido de titânio em substrato de alumínio pela técnica spin coating**. 2022. 61 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022.

REN21 (França). **Renewables 2022 Global Status Report**. Paris. REN21 Secretariat, 2022. 401 p. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf. Acesso em 28 out. 2022.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Silício grau solar: uma revisão das tecnologias de produção**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

SAMPAIO, S. G. **Estudo e Caracterização de Novos Corantes Naturais para Aplicação em Células Solares Sensibilizadas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **International energy outlook 2021**. 2022. 40 p. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_Narrative.pdf. Acesso em 24 out. 2022.

VINAAYAK, S.B. *et al.* Enhancing the performance of TiO₂ based N-DSSC using dye extracted from Cladophora Columbianana, Ludwigia repens and mixed sensitizer. **Optical Materials**, v. 133, nov. 2022.

XUHUI, S. *et al.* Performance comparisson of dye-sensitized solar cells by using different metal oxide- coated TiO₂ as the photoanode. **Aip Advances**, v. 4, n. 3, 14 mar. 2014.

APÊNDICE A – Código em Phyton para modelagem matemática do sistema de refrigeração do simulador solar

```

"""
Considerações:
Escoamento completamente desenvolvido
fluxo de calor constante
Regime permanente
"""
import numpy as np

#Variável|Colchetes para unidade de medida| descrição
#Dados estrutura

S=0.04 # [m] | espaço entre tubos

L=0.3 # [m] | comprimento bloco

W=0.4 # [m] | largura bloco

N=8 # [adm] | número de tubos

D=0.010 # [m] | diâmetro do tubo

#Dados do Fluido (à temp. média 25 °C| aprox. 300K)

Cp= 4.178 # [J/kg.K]

Pr= 5.125 # [adm]

rho= 995 # [kg/m³]

mi= 0.000759#[kg/m.s]

Kagua=0.619 # [W/m.K] | Condutividade térmica da água

Kal = 237 # [W/m.K] | Condutividade térmica do alumínio

#Dados do sistema

qc = 1000 # [W/m²]| fluxo de calor da lâmpada no bloco

m_dot = 0.074953 # [kg/s]| Fluxo de massa em todos os tubos

u_med=m_dot/(N*rho*np.pi*(D**2))#[m/s] | velocidade média dentro de
cada tubo (com fluxo de massa dividido pela quantidade de tubos)

Re = rho*u_med*D/mi # [adm] | dependeria do chiller, porém considera-
se turbulento

Tm_i =298 # [K] | temperatura média de entrada no bloco
(temp. esperada)

Tm_o= 313 # [K] | temperatura média de saída no bloco
(ASSUMIDA)

```

```

Tm_med=(Tm_i+Tm_o)/2

qs= qc*(L*W)/(N*np.pi*D*L) #[W] | energia transferida aos tubos
x=L                               #[m] | para cálculo de Tm out

#Tm_o= Tm_i +((qs*np.pi*D*x))/(m_dot*Cp) #[K] | eq 8.40 incropera

if Re > 10000:
    Nul= 0.023*(Re**0.8)*(Pr**0.3) #Dittus, com n=0.3 para
    resfriamento

else:
    #Número de Nusselt para região de entrada e condição de contorno de
    temperatura de superfície constante

    Nul = 3.66 + ((0.065*(D/L)*Re*Pr)/(1+(0.04*((D/L)*Re*Pr)**(2/3))))

h=Nul*Kagua/D #[W/m².K]

#temperatura na superfície do tubo interno

Tsup= Tm_med + (qc*W)/(h*N*np.pi*D) #[K]

print("\nqs=",qs," W\nm ponto =",m_dot," kg/s\nvelocidade u
med=",u_med," m/s\nTm_out=",Tm_o," K\nnúmero de Nusselt =",Nul,
"\nh=",h,"W/m²K\nTsup=",Tsup)

```

ANEXO A – Datasheet das lâmpadas de Vapor Metálico Philips HPI-T 1000W utilizadas no simulador solar



HPI-T

HPI T 1000W 543 E40 220V 1SL/4

Lâmpadas de vapor metálico de quartzo com bulbo exterior transparente.

Avisos e Segurança

- Use somente em luminárias totalmente fechadas, mesmo durante testes (IEC 61167, IEC 62035, IEC 60598)
- A luminária deve ser capaz de conter as partes quentes da lâmpada em caso de rupturas
- A quebra da lâmpada raramente poderá impactar na saúde das pessoas. Se a lâmpada quebrar, ventile a sala por 30 minutos e remova as partes, preferencialmente com luvas. Coloque estas partes em uma sacola plástica selada e leve ao local apropriado de descarte para reciclagem. Não utilize aspirador.

Dados do produto

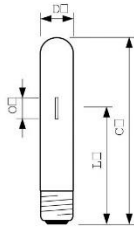
Informações gerais		Temperatura de cor correlacionada (Nom.)	
Casquilho	E40 [E40]		4300 K
Posição de funcionamento	P [p]	Eficiência luminosa (nominal) (Nom.)	83 lm/W
Vida útil até 5% de falhas (Nom.)	3000 h	Índice de restituição cromática (Nom.)	57
Vida útil até 10% de falhas (Nom.)	5500 h	Dados elétricos e de operação	
Vida útil até 20% de falhas (Nom.)	8000 h	Tensão de alimentação da lâmpada	220 V [220]
Vida útil até 50% de falhas (Nom.)	12000 h	Power (Rated) (Nom)	990 W
Descrição do sistema	na [-]	Tempo preparatório da corrente de lâmpada (Máx.)	14,2 A
Dados técnicos de luz		Corrente de lâmpada (EM) (Nom.)	8,25 A
Código da cor	543 [CCT de 4300K]	Tensão de alimentação da ignição (Máx.)	198 V
Fluxo luminoso (nominal) (Min.)	73890 lm	Tensão de alimentação da ignição (Min.)	198 V
Fluxo luminoso (nominal) (Nom.)	82100 lm	Tempo de ignição (Máx.)	30 s
Designação da cor	Branca fria (CW)	Tensão (Máx.)	140 V
Manutenção luminica 10.000 h (Nom.)	75 %	Tensão (Min.)	120 V
Manutenção luminica 2.000 h (Nom.)	87 %	Tensão (Nom.)	130 V
Manutenção luminica 5.000 h (Nom.)	80 %	Controles e dimerização	
Coordenada X de cromaticidade (Nom.)	370	Regulável	Não
Coordenada Y de cromaticidade (Nom.)	380		

HPI-T

Dados mecânicos e de compartimento	
Acabamento da lâmpada	Claro
Forma da lâmpada	T65 [T 65 mm]
Aprovação e aplicação	
Conteúdo de mercúrio (Hg) (Nom.)	86 mg
Consumo de energia kWh/1000 h	1089 kWh
Requisitos de design da luminária	
Temperatura da lâmpada (Máx.)	555 °C
Temperatura do casquilho (Máx.)	300 °C

Dados do produto	
Código do produto completo	871829167617100
Nome de produto da encomenda	HPI T 1000W 543 E40 220V 1SL/4
EAN/UPC – Produto	8718291676171
Código de encomenda	928482600094
Código local	HPI-T1000W
Numerador – Quantidade por embalagem	1
Numerador SAP – Embalagens por exterior	4
Nº do material (12NC)	928482600094
Net Weight (Piece)	0,438 kg

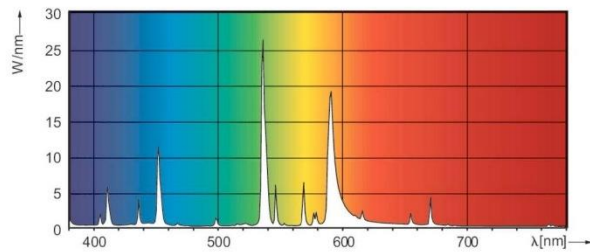
Desenho dimensional



HPI T 1000W 543 E40 220V 1SL/4

Product	D (max)	O	L	C (max)
HPI T 1000W 543 E40 220V 1SL/4	66 mm	80 mm	240 mm	382 mm

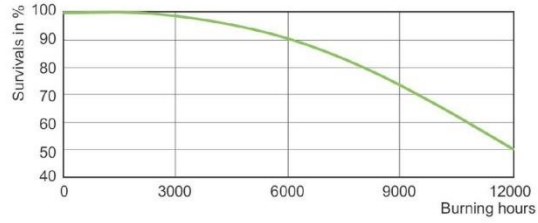
Dados fotométricos



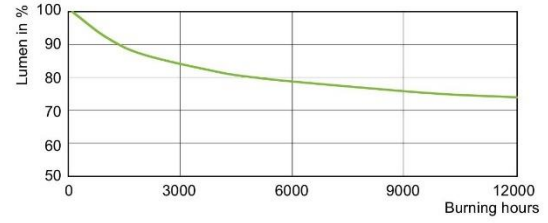
LDPO_HPI-THW-Spectral power distribution Colour

HPI-T

Vida útil



LDLE_HPI-THW_0003-Life expectancy diagram



LDLM_HPI-THW_0003-Lumen maintenance diagram



© 2022 Signify Holding Todos os direitos reservados. Signify não oferece qualquer representação ou garantia quanto à precisão ou à integridade das informações incluídas aqui e não se responsabiliza por qualquer ação em função disso. As informações apresentadas neste documento não se destinam a qualquer oferta comercial e não compõem parte de qualquer cotação ou contrato, a menos que seja acordado pela Signify. Philips e o Philips Shield Emblem são marcas comerciais registradas da Koninklijke Philips N.V.

www.lighting.philips.com
2022, Agosto 7 - Dados sujeitos a alteração

Fonte: Philips (2022 p.1-3)