

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RONALD LUIZ CASTIGLIONI DAVI**

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , PARA APLICAÇÃO COMO  
MATERIAL TRANSPORTADOR DE ELÉTRONS EM CÉLULAS SOLARES  
SENSIBILIZADAS POR CORANTE**

**CAMPO MOURÃO**

**2025**

**RONALD LUIZ CASTIGLIONI DAVI**

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, PARA APLICAÇÃO COMO  
MATERIAL TRANSPORTADOR DE ELÉTRONS EM CÉLULAS SOLARES  
SENSIBILIZADAS POR CORANTE**

**Synthesis and characterization of nb<sub>2</sub>o<sub>5</sub> for application as an electron transport  
material in dye-sensitized solar cells**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Química, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador(a): Gideã Taques Tractz.

**CAMPO MOURÃO**

**2025**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**RONALD LUIZ CASTIGLIONI DAVI**

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, PARA APLICAÇÃO COMO  
MATERIAL TRANSPORTADOR DE ELÉTRONS EM CÉLULAS SOLARES  
SENSIBILIZADAS POR CORANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Química da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 27/junho/2025

---

Gideã Taques Tractz  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Estela dos Reis Crespan  
Doutorado  
Universidade Federal de Santa Maria

---

Tatiana Lima Valério  
Doutorado  
Universidade Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**

**2025**

Dedico este trabalho à minha família, pelos momentos de ausência e seu total apoio.

## AGRADECIMENTOS

De início, agradeço a Deus.

Ao Professor Dr. Gideã Taques Tractz por aceitar ser meu orientador, por ser paciente, e por toda ajuda e ensinamento. Muito obrigado!

À Professora Dra. Estela dos Reis Crespan e Professora Dra. Tatiana Lima Valério por aceitarem o convite de fazerem parte da Banca deste trabalho.

À todos os meus professores e professoras, que tanto admiro!! Em especial, aos professores dos departamentos de química, engenharia química e engenharia de alimentos por toda ajuda e por serem pessoas incríveis.

Aos meus pais Rogerio e Ligia, os melhores pais. A meus avós Ilda e Derli, os melhores avós. À minha irmã Rafaela e aos meus irmãos Ricardo e Rogerio Jr. por me ouvirem sempre e sempre me apoiarem, por me incentivarem, pelos conselhos e ajudas e por serem a melhores irmãos.

A todos os meus familiares. Aos meus amigos e colegas.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão (UTFPR – CM)

A Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO).

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

A Fundação Araucária, pelo apoio parcial as atividades desse TCC.

Muito obrigado!

## RESUMO

Com o aumento da demanda energética, atrelado ao crescimento populacional, as fontes de energia renováveis acendem como excelente alternativa. Dentre as tecnologias fotovoltaicas desenvolvidas, as células solares sensibilizadas por corante (CSSC) ganharam destaque em sistemas que utilizam a energia do sol. As CSSC apresentam na composição um ânodo, um eletrólito e um cátodo. Na fabricação de interfaces anódicas, vários materiais podem ser utilizados, como exemplo o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Este trabalho tem como objetivo investigar a síntese de pentóxido de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) pelo método Pechini, seguido de calcinação em diferentes temperaturas (500 °C, 600 °C e 700 °C) para avaliar suas propriedades estruturais, morfológicas e eletroquímicas como material de foto-anodo em CSSCs. Análises de MEV e DRX revelaram que a calcinação a 600 °C produziu um material com tamanho de partícula otimizado ( $642,17 \pm 37$  nm) e estrutura cristalina ortorrômbica, favorecendo o transporte eletrônico e a adsorção do corante. A estimativa do tamanho do cristalito mostrou uma proporcionalidade, com o aumento da temperatura de sinterização, todavia, o gap não sofreu modificação com efeito das temperaturas utilizadas (2,97 eV). A caracterização eletroquímica, incluindo potencial de circuito aberto, curvas J-V e espectroscopia de impedância, indicou que a amostra a 600 °C apresentou desempenho fotovoltaico superior, com densidade de corrente de  $4,23 \text{ mA cm}^{-2}$  e potencial de 0,694 V, alcançando uma eficiência de conversão de energia de 1,39% e tempo de vida do elétron igual a 0,159 s. Esses resultados sugerem que o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sob condições controladas de calcinação, pode atuar como uma alternativa promissora frente à substituição do  $\text{TiO}_2$  em aplicações de CSSC.

Palavras-chave: Célula de Gratzel; Energia Renovável; Nióbio; Pechini.

## ABSTRACT

With the increase in energy demand, coupled with population growth, renewable energy sources emerge as an excellent alternative. Among the developed photovoltaic technologies, dye-sensitized solar cells (DSSC) have gained prominence in systems that utilize solar energy. DSSCs consist of an anode, an electrolyte, and a cathode. In the fabrication of anodic interfaces, various materials can be used, such as  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . This work aims to investigate the synthesis of niobium pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) by the Pechini method, followed by calcination at different temperatures (500 °C, 600 °C, and 700 °C) to evaluate its structural, morphological, and electrochemical properties as a photoanode material in DSSCs. MEV and DRX analyses revealed that calcination at 600 °C produced a material with optimized particle size ( $642.17 \pm 37$  nm) and orthorhombic crystalline structure, favoring electron transport and dye adsorption. The crystallite size estimation showed proportionality with the increase in sintering temperature; however, the bandgap did not change with the effect of the temperatures used (2.97 eV). Electrochemical characterization, including open-circuit potential, J-V curves, and impedance spectroscopy, indicated that the sample at 600 °C exhibited superior photovoltaic performance, with a current density of  $4.23 \text{ mA cm}^{-2}$  and a potential of 0.694 V, achieving an energy conversion efficiency of 1.39% and an electron lifetime of 0.159 s. These results suggest that  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , under controlled calcination conditions, can act as a promising alternative to  $\text{TiO}_2$  in DSSC applications.

Keywords: Gratzel Cell; Renewable Energy; Niobium; Pechini.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração esquemática de uma célula CSSC clássica e seu mecanismo de funcionamento, em que a letra D representa o corante e BC a banda de condução.....	18
Figura 2 - Imagem exemplificação de banda proibida (bandgap) dos metais, semicondutores e isolantes .....	21
Figura 3 - Eletrodos de trabalho, de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> depositados em vidro FTO .....	26
Figura 4 - Eletrodos de Trabalho no processo de impregnação do corante sob a superfície do Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	27
Figura 5 - CSSCs montadas em formato sanduiche .....	28
Figura 6 - Imagens de MEV (Microscopia eletrônica de varredura para o Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> sintetizado a temperaturas de 500 °C(A), 600 °C(B) e 700 °C(C) e os respectivos histogramas de distribuição das partículas.....	29
Figura 7 - DRX dos óxidos de nióbio sintetizados pela metodologia Pechini e calcinados em diferentes temperaturas .....	32
Figura 8 - Estimativa do Band Gap direto calculado via metodologia Kubelka-Munk para o Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	33
Figura 9 - Potencial de Circuito Aberto (V <sub>oc</sub> ) para CSSCs produzidas com partículas de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C .....	34
Figura 10 – Curvas de corrente por potencial (J-V) para a CSSCs produzidas com partículas de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C .....	35
Figura 11 - Diagrama de Nyquist para CSSCs produzidas com partículas de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C .....	38

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Dados de Tamanho de partícula e potencial Zeta em solução de etanol das partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzidas na metodologia Pechini, em diferentes rotas térmicas.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 2 - Tamanho médio do Cristalito obtido para cada Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em sua respectiva temperatura de síntese .....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 3 - Parâmetros fotovoltaicos para CSSCs preparados com partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4 – Comparação entre CSSCs com diferentes óxidos semicondutores .....</b>	<b>37</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Nióbio
CSSC	Célula solar sensibilizada por corante
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell
GAP	Banda proibida do semicondutor
FTO	Óxido de estanho dopado com flúor
BC	Banda de Condução
BV	Banda de valência
CE	Contra eletrodo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difração de Raios X
DLS	Espalhamento Dinâmico de Luz
V <sub>oc</sub>	Potencial de circuito aberto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Energias Renováveis e Energia Solar .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Dispositivos Fotovoltaicos .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Composição e funcionamento das Células Solares Sensibilizadas Por Corante (CSSC ou DSSC) .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Nióbio .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5</b>	<b>Pentóxido De Nióbio .....</b>	<b>20</b>
<b>3.6</b>	<b>Síntese do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> .....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>RESSULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização morfológica e estrutural das partículas .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2</b>	<b>Caracterização foto-eletróquímica dos dispositivos.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma crescente preocupação a longo prazo está relacionada a demanda energética. Conforme apresentado no trabalho de Modis (2025) as matrizes de carvão, óleo e gás são as fontes de energias mais utilizadas, tendência que deve ser revertida com o fortalecimento das políticas de transição energética, uma vez que as matrizes energéticas não renováveis, vem causando graves problemas ambientais (Tolmasquim; Guerreiro; Gorini, 2007).

Os danos, como a degradação da camada de ozônio e contaminação da atmosfera, trazem um risco muito alto a vida no planeta e exigem a necessidade de remediação (Drumm *e't al.*, 2014). Com o objetivo de solucionar tal problemática, estudos buscando fontes de energias renováveis e menos prejudiciais, como a hidroelétrica, eólica e a solar, vem crescendo juntamente com sua implantação (Modis, 2024).

A utilização desses sistemas anualmente se eleva, uma vez que há uma grande preocupação com a diversificação da matriz energética mundial e nacional. Isto ocorre, visto que sistemas de biomassa e oriundos da potência hidroelétrica, que garantem grande parte da composição renovável brasileira, tem um potencial de crescimento mais limitado, devido a condições de matérias primas e fluxos hídricos. Por outro lado, a energia oriunda do sol, é uma alternativa promissora, para conversão em energia elétrica, pois pode ser instalada em locais de difícil acesso, tem uma fonte inesgotável, considerando a escala de vida humana, e é fornecida a população de maneira gratuita (Modis, 2024).

Visando esse potencial infinito de conversão de energia a partir do sol, as placas solares são comercializadas em diversos modelos e mecanismos de conversão. Entretanto, há certas limitações em sua funcionalidade e custo para produção. Os dispositivos comercializados atualmente em larga escala, são produzidos a partir de silício que tem uma metodologia de produção onerosa que acaba inviabilizando sua distribuição global com custo reduzido (Zulehner, 1983). Sendo estes dispositivos caracterizados pela nomenclatura de dispositivos fotovoltaicos de primeira geração, são formados por filmes cristalinos espessos em estrutura mono ou policristalinas, contendo Silício como material majoritário.

Com a necessidade da melhoria de eficiência e uma busca por melhor custo-benefício, surgiram as células solares de terceira geração, como as células solares sensibilizadas por corantes (CSSC) (Kant; Singh, 2022).

Estes dispositivos apresentam na composição, um corante, um eletrólito e um óxido semiconductor, sendo este último o  $\text{TiO}_2$  usualmente empregado. Óxidos alternativos possivelmente menos onerosos, como o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , também se mostram promissores, pois apresentam características semelhantes ao titânio e têm a vantagem de serem abundantes em território nacional (Tractz *et al.*, 2020).

A cristalinidade do óxido utilizado e o tamanho da partícula são propriedades que influenciam no mecanismo de conversão energética e devem ser analisados. Além disso, as rotas sintéticas utilizadas têm significativa participação em tais propriedades (Tractz *et al.*, 2020). Assim, este trabalho tem como objetivo sintetizar óxidos de nióbio pela metodologia Pechini, para posterior aplicação em uma célula solar sensibilizada por corante.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo sintetizar óxidos de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, empregando a rota Pechini, com posterior aplicação em células solares de terceira geração.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Produzir óxidos de nióbio em temperaturas de 500 °C 600 °C e 700°C
- Caracterizar morfológicamente e estruturalmente os materiais sintetizados.
- Verificar a capacidade de transporte de carga de tais materiais como material transportador de elétrons em células solares sensibilizadas por corante, utilizando técnicas eletroquímicas.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Os métodos de conversão de energia não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural, têm sido as principais fontes de energia global por décadas. No entanto, seu uso extensivo traz significativos impactos ambientais. A queima de combustíveis fósseis é o maior responsável pela emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas. Esses gases potencializam o efeito estufa, resultando no aquecimento da superfície terrestre e mudanças climáticas severas, incluindo aumento do nível do mar, eventos climáticos extremos e alterações nos padrões de precipitação (IPCC, 2021).

Além disso, a extração e processamento de combustíveis fósseis têm consequências ambientais graves. A mineração de carvão e a perfuração de petróleo e gás podem levar à degradação de ecossistemas, poluição da água e do solo, e a perda de biodiversidade. Os derramamentos de petróleo, como o desastre do Golfo do México em 2010, ilustram os riscos ambientais catastróficos associados a essas práticas (Jernelöv, 2010). A contaminação de aquíferos e a destruição de habitats naturais são exemplos adicionais de danos ambientais causados pela extração de combustíveis fósseis (Howarth, 2014).

Diante do exposto, o cuidado em atender a economia circular, que estende a vida útil dos recursos e reduz significativamente a geração de resíduos. Enquanto verifica-se a necessidade de investimento em pesquisa e distribuição de fontes limpas de energia, como as energias renováveis emergem como uma solução sustentável para mitigar os impactos ambientais das fontes não renováveis.

#### **3.1 Energias Renováveis e Energia Solar**

Em contraste, as energias renováveis emergem como uma solução sustentável para mitigar os impactos ambientais das fontes não renováveis. Dito isto, as matrizes limpas como solar, eólica, hídrica e biomassa, são derivadas de recursos naturais que são reabastecidos naturalmente em uma escala de tempo humana e têm um impacto ambiental reduzido. Essas fontes de energia não emitem gases de efeito estufa durante a geração de eletricidade, contribuindo significativamente para a redução das emissões globais e mitigação das mudanças climáticas (REN21, 2022).

Entre as energias renováveis, a energia solar destaca-se por seu potencial de transformação energética no cenário energético global. A energia solar é abundante, disponível em praticamente todos os lugares do planeta e tem um impacto ambiental mínimo. A geração de eletricidade a partir da energia solar fotovoltaica não emite poluentes atmosféricos ou gases de efeito estufa durante a operação. Além disso, os avanços tecnológicos têm continuamente reduzido os custos de instalação e aumentado a eficiência dos painéis solares, tornando a energia solar cada vez mais acessível e competitiva economicamente (Irena, 2022).

A adoção de sistemas solares fotovoltaicos contribui para a descentralização da geração de energia, o que pode melhorar a resiliência das redes elétricas e reduzir as perdas de transmissão. Além disso, a energia solar pode ser integrada a edifícios e infraestruturas existentes, como telhados de residências e empresas, promovendo o conceito de "prosumers" (produtores e consumidores de energia) e incentivando a participação ativa dos cidadãos na transição energética (Gielen *et al.*, 2019).

### **3.2 Dispositivos Fotovoltaicos**

A energia solar tem dentre as diversas tecnologias desenvolvidas, os dispositivos de primeira, segunda e terceira geração. Os dispositivos comercializados atualmente em larga escala, são produzidos a partir de silício que tem uma metodologia de produção onerosa que acaba inviabilizando sua distribuição global (Zulehner, 1983; Kant; Singh, 2022).

Sendo estes dispositivos caracterizados pela nomenclatura de dispositivos fotovoltaicos de primeira geração, sendo eles formados por filmes cristalinos espessos em estrutura mono ou policristalinas, principalmente produzidas com silício (90% dos casos), que consistem em uma tecnologia mais antiga e limitada com uma produção onerosa devido a busca por maior pureza do silício.

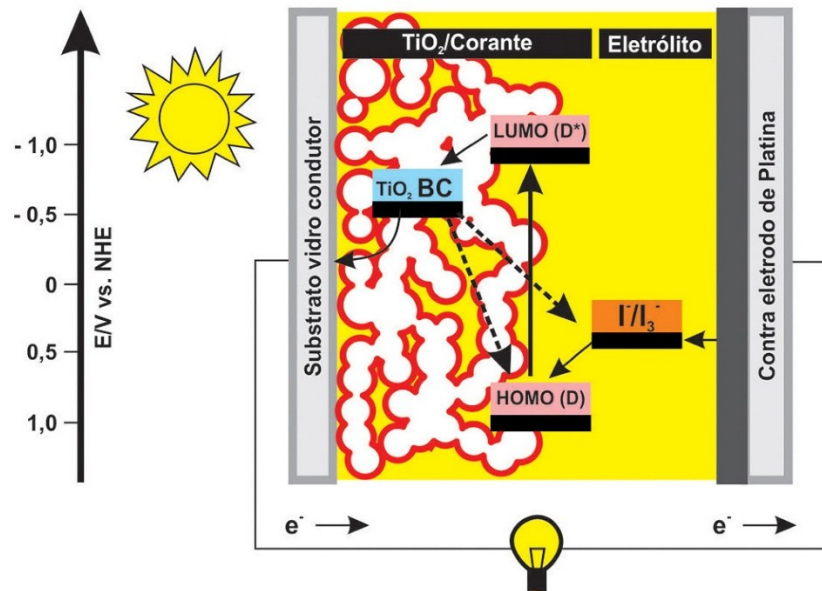
Com a necessidade da melhoria de eficiência, redução de custos, diversificação de matérias primas e descentralização das fontes, surgiram as células solares de segunda e terceira geração. As células de segunda são consistidas em silício amorfo e/ou silício microcristalino em películas finas, incluindo células solares de filme fino feitas de outros elementos, que podem vir a ser mais baratas e fáceis de produzir. Com este mesmo objetivo, surgiram as células solares de terceira geração, que contemplam os seguintes tipos, as células orgânicas, as de perovskitas, células

de pontos quânticos e células solares sensibilizadas por corantes (DSSCs ou CSSCs), que se mostram interessantes e promissoras (Kant; Singh, 2022).

### 3.3 Composição e funcionamento das Células Solares Sensibilizadas Por Corante (CSSC ou DSSC)

Nas CSSCs, diferentemente das células solares tradicionais de silício, é empregado um corante sensibilizador para capturar a luz solar e gerar eletricidade. A estrutura básica dessas células, como mostrado na figura 1, inclui um substrato de vidro condutor, uma camada de óxido semiconductor, um corante sensibilizador, um eletrólito e um contra elétrodo.

**Figura 1 - Ilustração esquemática de uma célula CSSC clássica e seu mecanismo de funcionamento, em que a letra D representa o corante e BC a banda de condução**



Fonte: Sonai *et al.* (2015)

O funcionamento das CSSC inicia-se com a absorção de luz pelo corante sensibilizador, que excita os elétrons para um estado de energia superior. Esses elétrons excitados são então injetados na banda de condução do  $\text{TiO}_2$ , permitindo que sejam transportados até o contra eletrodo, frequentemente utilizado a platina, gerando assim uma corrente elétrica. O corante oxidado é regenerado pelo eletrólito, normalmente uma solução de iodeto/tri-iodeto, que doa elétrons ao corante, completando o ciclo redox (O'Regan; Grätzel, 1991).

As CSSC possuem várias vantagens, incluindo menor custo de produção uma vez que temperatura utilizada na síntese é bem menor em comparação com as células de silício, possibilidade de utilização em suportes flexíveis, e bom desempenho em

condições de baixa luminosidade. A flexibilidade de fabricação em substratos diversos permite sua aplicação em dispositivos portáteis e em integração arquitetônica (Grätzel, 2003).

Pesquisas recentes têm focado em melhorar a eficiência e a estabilidade das CSSC por meio da incorporação de novos materiais para o corante, eletrólito e eletrodos (Tractz, 2022). Por exemplo, a introdução de nanomateriais e novos corantes orgânicos e inorgânicos tem mostrado resultados promissores na melhoria das propriedades fotovoltaicas das CSSCs (Konwar et al, 2024; Barbero; Santato, 2013).

Quanto aos corantes, esses desempenham papel fundamental na conversão da luz solar em energia elétrica, atuando como os principais responsáveis pela absorção da radiação e injeção de elétrons no semicondutor. Para isso, um bom corante deve apresentar forte absorção na região visível e próximo-infravermelha, alto coeficiente de absorção molar, estabilidade fotoquímica e um grupo de ancoragem eficiente (como carboxila ou hidroxila) que garanta boa fixação à superfície do semicondutor. Além disso, é essencial que o nível LUMO do corante esteja acima da banda de condução do semicondutor para possibilitar a injeção eficiente de elétrons, enquanto o nível HOMO deve estar abaixo do potencial redox do eletrólito, permitindo a regeneração do corante oxidado (Bhagat; Kumar, 2024).

O  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  pode ser utilizado como semicondutor substituto para o comum  $\text{TiO}_2$  na camada de transporte de elétrons, sendo depositado sobre um substrato condutor, geralmente vidro recoberto com óxido de estanho dopado com flúor (FTO). O  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  deve possuir uma alta área superficial, diretamente ligada aos tamanhos de partícula, para maximizar a adsorção do corante sensibilizador, geralmente um complexo de rutênio. Quando iluminado, o corante absorve a luz e excita os elétrons, que são transferidos para a camada de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , promovendo a geração de corrente elétrica (Fuziki *et al.*, 2023; Gong *et al.*, 2023; O'Regan; Grätzel, 1991).

Dessa forma os óxidos de nióbio tornam-se promissores, uma vez que nióbio é um elemento crucial em diversas aplicações industriais devido às suas propriedades únicas.

### 3.4 Nióbio

O nióbio é um elemento crucial em diversas aplicações industriais devido às suas propriedades, como alta resistência à corrosão e em temperaturas elevadas,

além de ser um excelente supercondutor em devidas condições de aplicação. Sua principal aplicação é na produção de aços de alta resistência e ligas especiais, utilizados na construção civil, automotiva, aeroespacial e em indústrias de óleo e gás como descrito por TANB (2024). O Brasil detém aproximadamente 98% das reservas mundiais de nióbio, com destaque para as minas de Araxá (Minas Gerais) e Catalão (Goiás), tornando-se o maior produtor e exportador desse metal (Tavares, 2017).

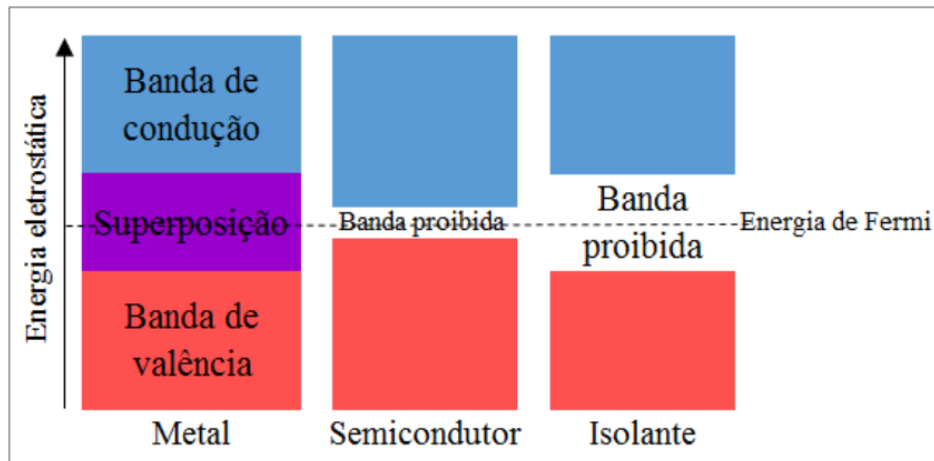
O processo de extração do nióbio envolve etapas de mineração, beneficiamento e refinamento. A mineração geralmente é a céu aberto, seguida pelo beneficiamento que inclui trituração, moagem e concentração do mineral. O refinamento subsequente utiliza processos químicos para purificar o nióbio e transformá-lo em ferro-nióbio, uma liga com ferro que é amplamente utilizada. No entanto, a extração do nióbio deve ser conduzida com rigorosos controles ambientais para mitigar impactos como a degradação do solo, poluição hídrica e a geração de resíduos tóxicos (Oliveira; De Lima, 2019).

Outro fator importante é a gestão sustentável das reservas, que envolve políticas de preservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico das comunidades locais. A integração de tecnologias avançadas e práticas de mineração sustentável são essenciais para garantir a viabilidade a longo prazo das operações de nióbio no Brasil. Isso inclui a recuperação de áreas mineradas e a minimização do uso de produtos químicos nocivos, promovendo a sustentabilidade ambiental e social (Assis *et al.*, 2020). Uma outra aplicação relacionada a utilização do nióbio, é a síntese de óxidos semicondutores, aplicados extensamente na forma de óxido em diversos sistemas, como supercapacitores, células a combustível e nos sistemas fotovoltaicos (Bruziquesi *et al.*, 2019).

### **3.5 Pentóxido De Nióbio**

O  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  é um material semicondutor que apresenta uma banda larga proibida de aproximadamente 3,2 eV. A banda proibida corresponde à diferença de energia entre a banda de valência, onde os elétrons se encontram ligados aos átomos, e a banda de condução, onde os elétrons podem circular livremente para transportar carga, como mostrado na Figura 2.

**Figura 2 - Imagem exemplificação de banda proibida (bandgap) dos metais, semicondutores e isolantes**



Fonte: (Correia; Dantas; Andrade, 2017)

Esse valor relativamente alto torna o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  adequado para aplicações em células solares sensibilizadas por corante (CSSCs), uma vez que o material absorve predominantemente radiação ultravioleta, cuja energia se enquadra nessa faixa. Dessa forma, a ampla banda permite que o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  gere pares elétron-buraco quando excitado pela luz, influenciando positivamente a eficiência do transporte dos portadores e, conseqüentemente, o desempenho do dispositivo fotovoltaico (Lee *et al.*, 2015).

Além disso, a estrutura cristalina do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  é um fator crucial que determina suas propriedades eletroquímicas e fotocatalíticas. Esse óxido pode ser sintetizado em diferentes fases, destacando-se a fase pseudo-hexagonal, também denominada  $\text{TT-Nb}_2\text{O}_5$ , e a fase ortorrômbica, ou  $\text{T-Nb}_2\text{O}_5$ .

A fase ortorrômbica do pentóxido de nióbio apresenta uma estrutura mais ordenada, promovendo melhor separação das cargas e diminuindo as taxas de recombinação dos pares elétron-buraco. É importante ressaltar que a fase ortorrômbica tem se demonstrado particularmente promissora para aplicações em CSSCs, pois pode ser obtida em temperaturas mais baixas, tornando o processo de síntese mais econômico e energeticamente viável, além de reduzir os custos de processamento (Tagliaferro *et al.*, 2005; Raba; Bautista-ruíz; Joya, 2016).

A modificação da superfície do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  também desempenha um papel importante, modificação esta que pode ser feita por síntese em atmosfera inerte (nitrogênio), que auxiliam a porosidade e por outras técnicas que auxiliam a formação e por sua vez a superfície disponível, que pode ser funcionalizada para aumentar a adsorção de corantes e demais reagentes. Essa otimização, quando aplicada em um

dispositivo fotovoltaico potencializa a absorção de luz e, por conseguinte, a geração de corrente elétrica, contribuindo para que o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  atue como uma alternativa sustentável e eficiente na transformação de energia solar em elétrica. Essa capacidade de adaptação não só favorece o desempenho dos dispositivos, mas também impulsiona o desenvolvimento de tecnologias renováveis economicamente viáveis (Jin; Wang; Lee, 2015).

Outra característica determinante para o desempenho dos dispositivos fotovoltaicos é a influência da morfologia e da estrutura do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Estudos recentes demonstram que a distribuição do tamanho dos cristalitos, a porosidade e a área superficial específica são decisivas para a dinâmica de transporte dos portadores de carga. Uma morfologia bem controlada não apenas maximiza a adsorção dos corantes, como também minimiza a recombinação dos pares elétron-buraco, aumentando o tempo de vida dos portadores e, conseqüentemente, a eficiência de conversão dos dispositivos. O controle morfológico durante a síntese – por meio de técnicas como o método sol-gel ou a utilização de precursores poliméricos – permite ajustar parâmetros críticos como o tamanho das partículas, a pureza cristalina e a distribuição das fases, aspectos indispensáveis para a aplicação em CSSCs (Gong *et al.*, 2023; Rani *et al.*, 2014).

A obtenção da fase ortorrômbica a temperaturas reduzidas reforça ainda mais o potencial do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  para aplicações em CSSCs, pois além de proporcionar um material de alta qualidade estrutural, contribui para um processo de síntese energeticamente eficiente e economicamente viável. A síntese a temperaturas mais baixas, como relatado, permite economia de energia sem comprometer as propriedades eletrônicas e a estabilidade térmica do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , oferecendo uma solução atrativa para a produção em escala e a redução dos custos dos dispositivos solares (Raba; Bautista-ruíz; Joya, 2016).

Ademais, estratégias de modificação, como a dopagem ou a formação de heteroestruturas, podem promover o deslocamento do band gap para a região da luz visível, ampliando a capacidade do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  de absorver a maior parte do espectro solar. Essa abordagem é especialmente vantajosa, considerando que a radiação visível compõe a porção mais expressiva da energia solar incidente, o que potencializa o aproveitamento do material em CSSCs de alto desempenho e baixo custo. Dessa forma, a conjugação entre controle morfológico, obtenção de fases cristalinas

diferenciadas e a otimização do band gap torna o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  um candidato altamente promissor para o avanço das tecnologias de energia renovável e sustentável.

### 3.6 Síntese do $\text{Nb}_2\text{O}_5$

A síntese de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  pode ser realizada por diferentes métodos, como a sol-gel, hidrotermal e deposição química. O método sol-gel é amplamente utilizado devido ao controle preciso sobre a composição e morfologia do material resultante. Neste método, um precursor de nióbio é dissolvido em um solvente, seguido pela formação de um gel através de reações de hidrólise e condensação, que após calcinado resulta no  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (Zhou; Yu; Xu, 2013). Em complemento, um método alternativo é chamado de “Pechini”, variação da metodologia sol para produção de nanomateriais, empregando ácido cítrico, etileno glicol e um precursor do óxido a ser sintetizado, com posterior queima. Enfatiza-se, que a queima do material pode ocorrer em diversas temperaturas, propiciando modificações na fase, cristalinidade e demais parâmetros morfológicos e estruturais (Pechini, 1967).

Enquanto o método sol-gel oferece flexibilidade e controle sobre as propriedades físicas do material, o método Pechini é mais eficiente na produção de materiais homogêneos com alta pureza. O método sol-gel é preferido para aplicações que exigem controle detalhado da microestrutura, enquanto o método Pechini é ideal para a produção de materiais homogêneos em grande escala (Fuziki *et al.*, 2023). A compreensão de tais características, são extremamente importantes para utilização em dispositivos fotovoltaicos, como as células solares sensibilizadas por corante.

Neste método, o ácido cítrico, é utilizado para formar um complexo com cátions metálicos o qual é então polimerizado utilizando um poliol, como o etilenoglicol, formando um gel polimérico. A decomposição térmica do gel resulta na formação de óxidos metálicos altamente homogêneos e com controle preciso da estequiometria e pureza (Fuziki *et al.*, 2023), método favorável a formação do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

No Processo Pechini, a temperatura de síntese desempenha um papel crucial na formação e nas propriedades finais das nanopartículas de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Durante a etapa de polimerização, uma temperatura controlada permite a formação de um gel homogêneo, onde os íons de nióbio são uniformemente distribuídos dentro da matriz polimérica. Se a temperatura for inadequada, pode ocorrer uma segregação de fases, resultando em um material heterogêneo (Pechini, 1967).

A etapa de calcinação é particularmente sensível à temperatura, uma vez que é responsável pela decomposição do polímero orgânico e pela formação do óxido metálico. Temperaturas mais baixas podem resultar em uma decomposição incompleta do polímero, levando à formação de partículas com impurezas orgânicas residuais. Por outro lado, temperaturas excessivamente altas podem causar a sinterização das partículas, resultando em um aumento no tamanho das partículas e uma possível perda de área superficial específica (Zhou *et al.*, 2013).

Estudos recentes demonstraram que temperaturas de calcinação entre 500°C e 700°C são adequadas para a produção de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com alta pureza e boas propriedades estruturais. Temperaturas dentro dessa faixa promovem a completa decomposição dos precursores orgânicos e a cristalização do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em fases desejadas, como a ortorrômbica ou monoclínica, dependendo das condições específicas de síntese (Liu *et al.*, 2021).

Portanto, a temperatura de síntese no Processo Pechini é fundamental para controlar a morfologia, a pureza e as propriedades estruturais das nanopartículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O controle preciso dessa variável é essencial para otimizar o desempenho do material em aplicações como catalisadores e em células solares sensibilizadas por corante (CSSC).

## 4 METODOLOGIA

As partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foram produzidas pela metodologia Pechini conforme relatado na patente de Pechini em 1967, com as devidas alterações nas rotas térmicas para assim observar como a temperatura de calcinação influencia as propriedades dos óxidos.

As sínteses foram realizadas utilizando 50 mL de etilenoglicol e 13,2 g de ácido cítrico, dissolvidos a uma temperatura de até 70°C, sendo a temperatura monitorada durante a dissolução. Após a completa solubilização do ácido cítrico, adicionou-se 2,7 g do complexo amoniacal de nióbio, fornecido pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração). A mistura foi então aquecida até que o líquido alcançasse 100°C, seguido de repouso por 12 horas (Tractz, 2022).

Após a produção da resina, a mesma foi calcinada em temperaturas de 500 °C, 600 °C e 700 °C com uma etapa de desaglomeração do polímero pirolisado em 400 °C (Tractz *et al.*, 2021). O tempo de queima totalizou 5 horas, com desaglomeração do material após 2 horas do início do processo de calcinação.

As partículas de Pentóxido de Nióbio tiveram suas estruturas analisadas por difração de raios X (DRX) em um equipamento D2 Phaser da Bruker, com radiação de CuK $\alpha$  1,54 Å e varredura de 15° a 80°. Os dados de DRX foram tratados utilizando a equação de Scherrer para o cálculo do tamanho médio dos cristalitos, conforme mostrado na Equação 1 (Tractz, 2022).

$$D = \frac{K*\lambda}{B*(\cos \theta)} \quad (1)$$

Onde D representa o tamanho dos cristalitos, K é a constante de Scherrer (k = 0,9),  $\lambda$  o comprimento de onda dos raios X, B o FWHM (largura total à meia altura) do pico de difração, e  $\theta$  o ângulo de Bragg.

Os óxidos também foram analisados por microscopia eletrônica de varredura em um equipamento Vega 3 Tescan, com detector SE e filamento de W a 20 kV. Utilizando as micrografias obtidas, foi realizada o cálculo de distribuição do tamanho de partícula, usando o software ImageJ (Zhang; Wang, 2023).

A análise de espalhamento dinâmico de luz (DLS) foi realizada para a aferição do tamanho e a distribuição dos óxidos em suspensão (meio etanólico), em conjunto com os valores de potencial zeta, que contribuem para uma avaliação da estabilização dos óxidos obtidos.

A análise de absorção do material sintetizado em diversas temperaturas foi realizada por Espectroscopia no Infravermelho do estado sólido (Espectrofotômetro UV-VIS-NIR; UV-3600i Plus - Shimadzu), sendo os valores de refletância utilizados para estimativa do gap do material, empregando-se a metodologia de Kubelka Munk e utilizando a Equação 2, com o R representando a refletância.

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2)$$

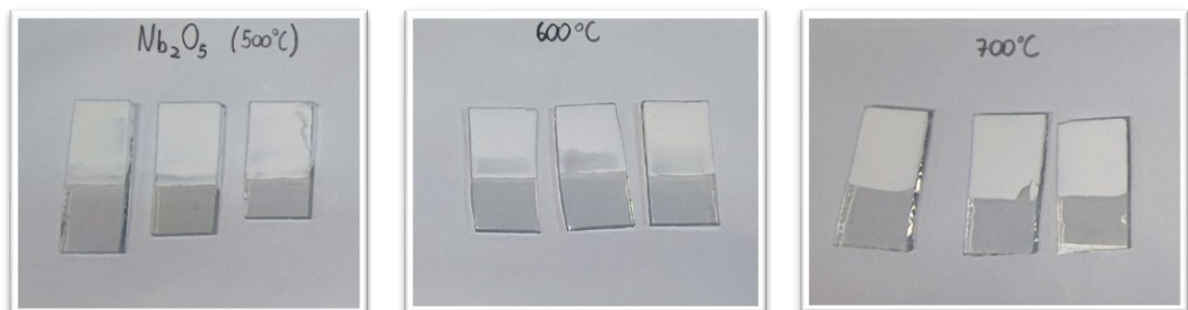
Esta abordagem permite a estimativa da energia do gap de banda proibida ao plotar  $[F(R)hv]^n$  versus energia do fóton ( $hv$ ), onde  $n$  é  $1/2$  para transições indiretas e  $2$  para transições diretas. O gap de banda foi determinado extrapolando a porção linear do gráfico de Tauc para o eixo de energia.

Para verificar a capacidade de transporte de elétrons dos filmes a serem produzidos com os óxidos sintetizados, foram empregados na construção de uma CSSC, todas produzidas em triplicata. Primeiramente, foi preparada uma pasta com os óxidos seguindo o roteiro descrito por Parussulo (2013).

Para produção da pasta foi utilizado 0,5 g de óxido de Nióbio, 16  $\mu$ L de acetil acetona, 161  $\mu$ L de  $H_2O$ , 161  $\mu$ L de PEG (Polietilenoglicol), com etapa de mistura e maceração por um tempo médio de 10 minutos. Em seguida adicionou-se 100  $\mu$ L de  $H_2O$  e 16  $\mu$ L do Triton X, agente emulsificante seguido de maceração.

As pastas foram depositadas em substrato condutor FTO (óxido de estanho dopado com flúor,  $7 \Omega \text{ sq}^{-1}$ ), via doctor blading e calcinados por 30 minutos a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . A calcinação visa a remoção dos compostos orgânicos utilizados para produção da pasta e a temperatura utilizada focou em remover os compostos sem alteração da estrutura do óxido, produzindo os eletrodos conforme a Figura 3.

**Figura 3 - Eletrodos de trabalho, de  $Nb_2O_5$  depositados em vidro FTO**

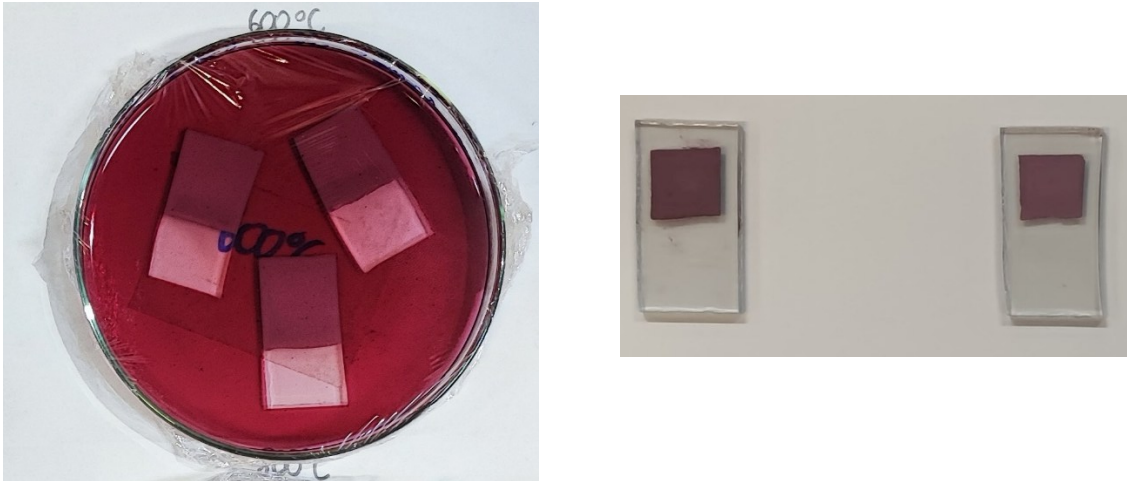


Fonte: Autor (2024)

As placas produzidas foram inseridas por 24 horas em solução de corante comercial N719 (bis(tetrabutylamônio)-cis-ditiocianato-bis(ácido-2,2'-bipiridina-4'-

carboxilato-4-carboxílico)rutênio(II)), corante esse importante pela sua estabilidade e bom desempenho em CSSCs, formando os eletrodos de trabalho como mostrados na Figura 4.

**Figura 4 - Eletrodos de Trabalho no processo de impregnação do corante sob a superfície do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$**



**Fonte: Autor (2024)**

Posteriormente, as células foram montadas em formato sanduíche, sendo o anodo o filme sintetizado com corante impregnado e o cátodo de platina eletrodepositada, como relatado no trabalho de tese de Tractz (2022). Como material transportador de elétrons, foi utilizado o eletrólito ( $3\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ), responsável por fazer a regeneração dos elétrons e o contato dos polos (Tractz *et al.*, 2021). A área de atividade do sistema foi limitada por técnicas de isolamento dos polos e selamento do eletrólito, partindo do uso de um filme adesivo bifacial de baixa espessura, com área interna delimitada a  $0,2 \text{ cm}^2$  por um equipamento auxiliar de perfuração, produzindo as células solares como mostrado na Figura 5.

**Figura 5 - CSSCs montadas em formato sanduiche**



**Fonte: Autor (2024)**

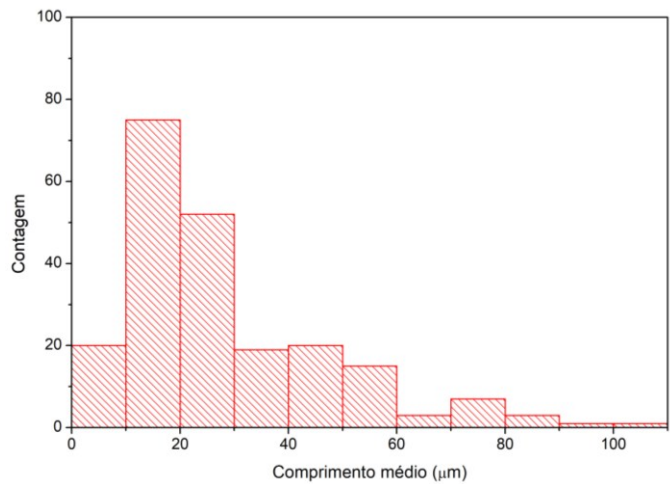
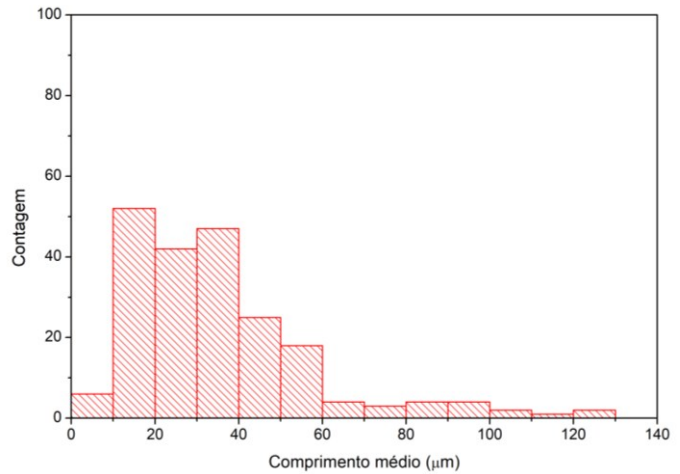
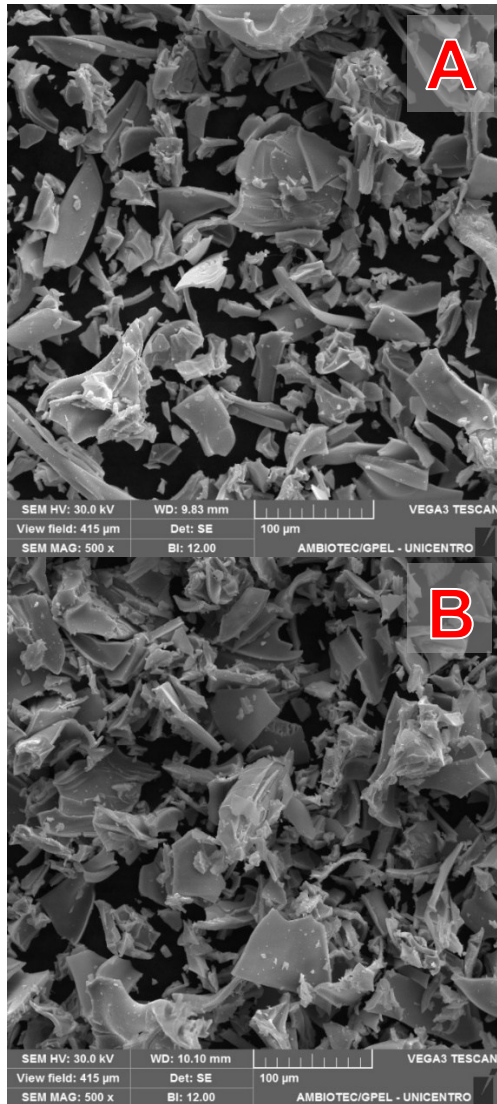
As células foram eletroquimicamente analisadas via técnicas de Potencial de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), curvas de Corrente por Potencial (J-V) e por espectroscopia de impedância eletroquímica (com faixa de frequência de 100 mHz a 1 kHz; com amplitude de 10 mV), realizados em um potenciostato Zhenium Zahner, com intensidade luminosa padrão de  $100 \text{ mW cm}^{-2}$  e espectro solar padrão de 1.5 AM, disponível no Grupo de pesquisa em Eletroquímica, da UNICENTRO.

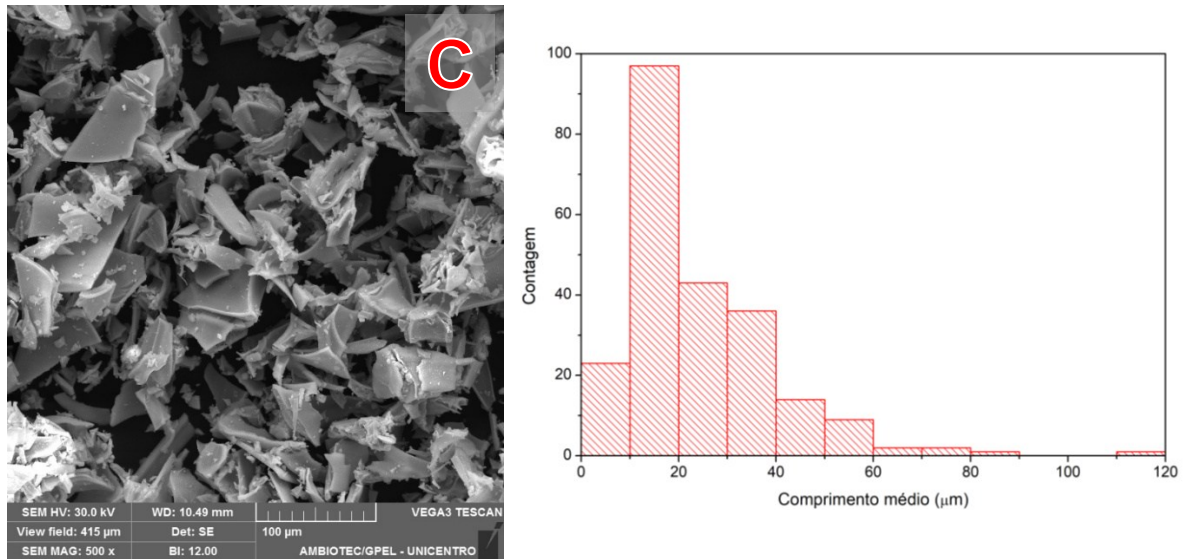
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização morfológica e estrutural das partículas

Na Figura 6 são apresentadas as micrografias eletrônicas de varredura para as partículas sintetizadas a diferentes temperaturas.

**Figura 6 - Imagens de MEV (Microscopia eletrônica de varredura para o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  sintetizado a temperaturas de 500 °C(A), 600 °C(B) e 700 °C(C) e os respectivos histogramas de distribuição das partículas**





Fonte: Autor (2025)

Ao se avaliar as imagens de MEV e os dados de comprimento médio das partículas fornecidos pelos histogramas, é possível observar que foram obtidos grânulos de morfologia irregular em todas as temperaturas de síntese e a presença de aglomerados, característicos da síntese via metodologia Pechini. A irregularidade é um fator favorável para adsorção do corante, pois como visto na literatura (Tractz; Boschen; Rodrigues, 2021) as superfícies rugosas e sem forma apresentam alta área superficial favorecendo a adsorção do corante (sensibilizador a luz solar da CSSC).

Nota-se também que o padrão entre os óxidos, se mantém semelhante apesar da mudança de temperatura. Tal morfologia irregular e tamanhos de partícula na faixa de micrometros, já foi observado em trabalhos anteriores, na síntese de óxidos como o  $\text{TiO}_2$ , onde a mesma morfologia foi obtida (Tractz; Boschen; Rodrigues, 2021).

A análise da distribuição do tamanho de partícula indicou predominância na faixa de 20–40  $\mu\text{m}$ , com melhor homogeneidade observada nas amostras tratadas a 500 °C e 600 °C. Por outro lado, as amostras calcinadas a 700 °C apresentaram uma maior concentração de partículas na faixa de 20  $\mu\text{m}$ , o que sugere um processo de sinterização mais pronunciado, favorecendo a formação de aglomerados menores e mais densos.

Para análise das partículas em suspensão, foi realizada a técnica de Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS), juntamente com o cálculo do Potencial Zeta, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Dados de Tamanho de partícula e potencial Zeta em solução de etanol das partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzidas na metodologia Pechini, em diferentes rotas térmicas**

Temperatura	Tamanho de Partícula (Diâmetro - nm)	Potencial Zeta (mV)
500 °C	827,63 ± 26,00	-25,53 ± 2,84
600 °C	642,17 ± 37,00	-8,27 ± 0,32
700 °C	1022,57 ± 46,80	-20,43 ± 1,33

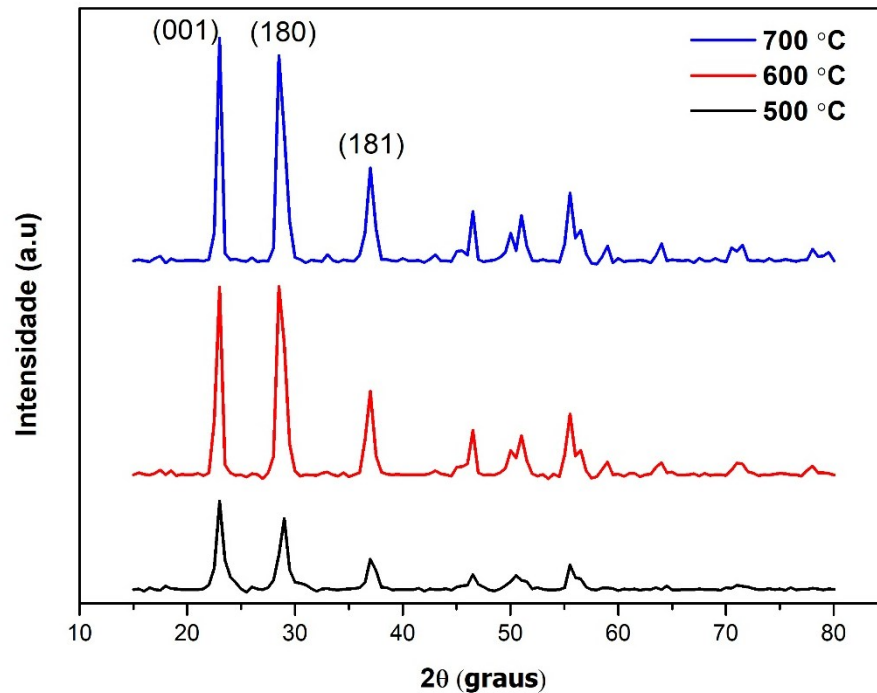
Fonte: Autor (2025)

A análise dos valores de tamanho de partícula e potencial Zeta corrobora com as observações morfológicas. Pode-se observar que a amostra tratada a 500 °C apresentou um diâmetro médio de 827,63 ± 26 nm e um potencial zeta de -25,53 ± 2,84 mV, indicando a formação de partículas de tamanho intermediário com boa estabilidade coloidal devido ao alto valor negativo do potencial zeta. A amostra tratada a 600 °C apresentou um diâmetro reduzido de 642,17 ± 37 nm e uma carga superficial menor, quando comparada às demais, sugerindo uma diminuição na estabilidade coloidal com maior propensão à formação de aglomerados (Jarzynska *et al.*, 2025).

A amostra calcinada a 700 °C mostrou um aumento significativo no tamanho das partículas, atingindo 1022,57 ± 46,8 nm, o que pode ser atribuído a uma sinterização mais intensa em altas temperaturas, resultando em partículas maiores e aglomerados mais densos. É importante enfatizar que partículas maiores tendem a reduzir a área de superfície ativa disponível para a adsorção de corantes, diminuindo a eficiência na conversão de energia solar (Hagfeldt *et al.*, 2010). Por outro lado, superfícies rugosas e uma distribuição heterogênea de partículas podem ainda aumentar a adsorção, como observado nas amostras tratadas a temperaturas mais baixas.

Na Figura 7, são mostrados os difratogramas de raios X, para os óxidos sintetizados.

**Figura 7 - DRX dos óxidos de nióbio sintetizados pela metodologia Pechini e calcinados em diferentes temperaturas**



Fonte: Autor (2024)

Ao se observar o DRX na figura 7 é possível ver picos estreitos e bem definidos nas mesmas regiões de  $2\theta$ . Assim, é possível compreender que a temperatura utilizada foi suficiente para a produção de materiais cristalinos e que não houve transição de fase nas condições de temperaturas testadas.

Em complemento, a catalogação dos picos foi realizada com o auxílio do Software Crystallografica®, e os planos (001), (180), e (181) foram determinados, característicos do nióbio na fase ortorrômbica (Tractz; Boschen; Rodrigues, 2021). Estas características reforçam a estabilidade da estrutura cristalina nas condições testadas e são relevantes para a aplicação de materiais como foto-ânodos em sistemas solares, uma vez que a fase ortorrômbica apresenta aplicações promissoras, devido ao seu menor custo de obtenção, boa área ativa e comprimento de difusão de portadores de carga.

A determinação do tamanho dos cristalitos via Equação de Scherrer foi realizada utilizando a equação 1 e os resultados obtidos se encontram na tabela 2.

**Tabela 2 - Tamanho médio do Cristalito obtido para cada Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em sua respectiva temperatura de síntese**

Amostra	Tamanho médio do Cristalito (nm)
500 °C	12,26
600 °C	14,39
700 °C	18,51

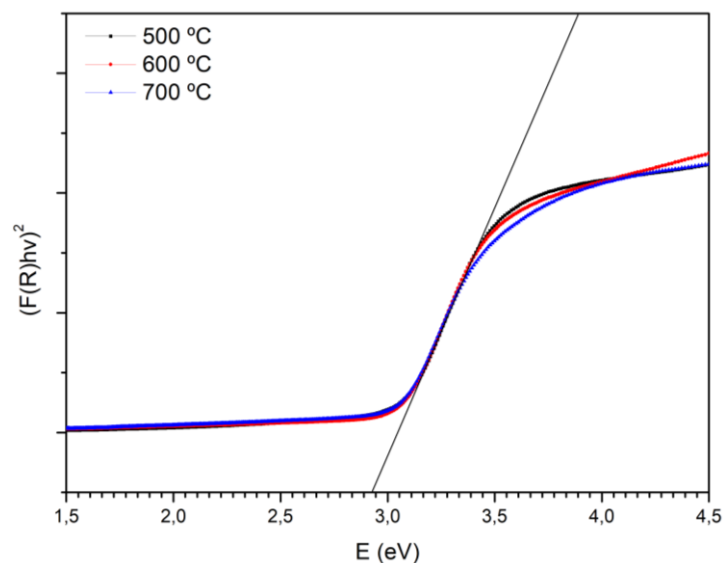
Fonte: Autor (2025)

Foram obtidos os valores de 12,26 nm, 14,39 nm e 18,51 nm para os pós sinterizados a 500 °C, 600 °C e 700 °C, respectivamente. Em essência, observa-se um aumento progressivo no tamanho dos cristalitos com o aumento da temperatura, associado ao crescimento dos domínios cristalinos, devido ao processo de sinterização.

Ao consultar a literatura, no trabalho apresentado por Costa *et al.* (2006), foi possível criar um comparativo quanto ao tamanho de cristalito, uma vez que valores na faixa de 15 nm foram encontrados. Para amostras sintetizadas em 500 °C e 600 °C, valores menores de 15 nm foram encontrados, indicando uma boa aplicabilidade em CSSCs, uma vez que o tamanho dos cristais pode influenciar a superfície disponível para adsorção dos corantes, alterando a eficiência de uma foto-conversão energética.

Para verificar a largura da banda proibida, a obtenção do gap do material foi realizada e encontra-se na Figura 8.

**Figura 8 - Estimativa do Band Gap direto calculado via metodologia Kubelka-Munk para o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**



Fonte: Autor (2025)

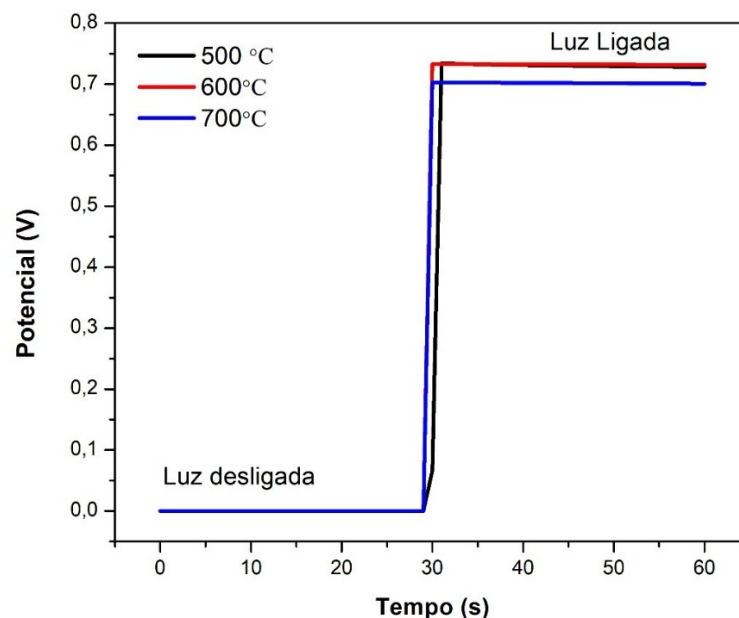
Os cálculos de gap foram realizados empregando os espectros de refletância obtidos para o estado sólido, via técnica espectroscopia na região do ultravioleta visível. Assim, a metodologia Kubelka-Munk foi empregada, e a extrapolação do gráfico permitindo a determinação do  $E_{gap}$  (Dias *et al.*, 2018). Foram encontrados valores aproximados de 2,93 eV sem variação nos valores devido as diferentes temperaturas de queima utilizadas. Esses resultados já eram esperados, visto que somente a fase ortorrômbica foi obtida para o material. Em adição, tal material mostra-se promissor, pois se aproxima dos valores de gap encontrados para o  $TiO_2$ , o qual na literatura é encontrado próximo de 3,2 eV, material este mais empregado como material transportador de elétrons em células solares (Dias *et al.*, 2018).

Para avaliação da capacidade de transporte de carga, em CSSC, os sistemas produzidos foram caracterizados, utilizando-se das técnicas eletroquímicas descritas.

## 5.2 Caracterização foto-eletroquímica dos dispositivos

Na Figura 9, é mostrado o diagrama de potencial de circuito aberto em função do tempo, para as células produzidas com  $Nb_2O_5$ .

**Figura 9 - Potencial de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ) para CSSCs produzidas com partículas de  $Nb_2O_5$  calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C**



Fonte: Autor (2024)

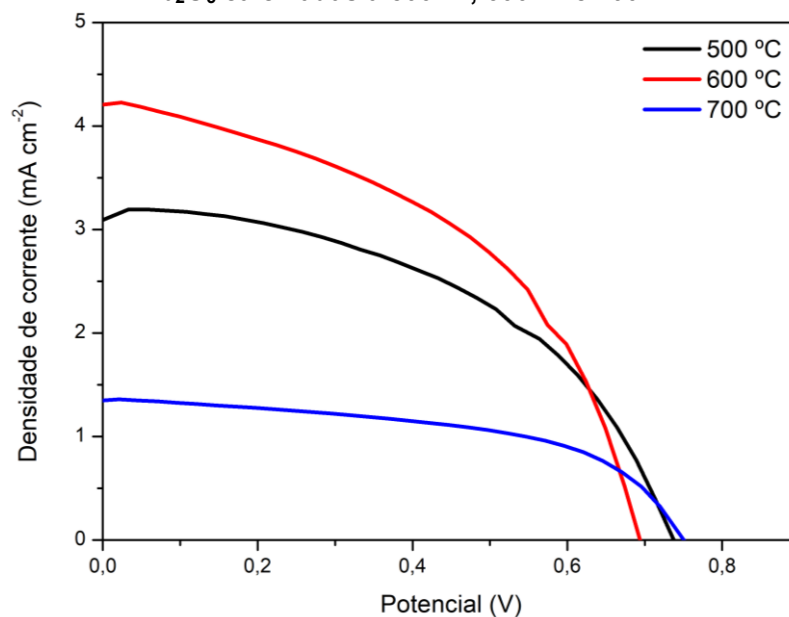
As análises de potencial de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), presentes no gráfico da figura 9, foram realizados em condições com e sem iluminação, com o objetivo de avaliar a fotossensibilidade do dispositivo CSSC construído com  $Nb_2O_5$  como material

transportador de elétrons. Na ausência de luz, o potencial registrado ficou próximo de 0 V, confirmando a ausência de atividade fotossensível. Com a aplicação de luz, o  $V_{oc}$  aumentou significativamente, atingindo aproximadamente 0,7 V. Esse valor é considerado promissor quando comparado ao  $TiO_2$ , que geralmente apresenta potenciais de circuito aberto dentro da mesma faixa (aproximadamente de 0,6 a 0,7 V), demonstrando a viabilidade do  $Nb_2O_5$  como um potencial substituto nas células solares sensibilizadas por corante (Andrade, 2016).

A formação do potencial de circuito aberto está intimamente relacionada à diferença entre o nível de Fermi do semiconductor e o potencial redox do eletrólito utilizado. Os resultados obtidos indicam que a banda de condução do  $Nb_2O_5$  está posicionada de forma adequada para a injeção de elétrons provenientes do corante para o semiconductor, favorecendo o processo de separação de carga. Além disso, os valores de  $V_{oc}$  registrados para os pós calcinados a diferentes temperaturas não apresentaram variações significativas, sugerindo que o posicionamento da banda de condução permaneceu estável, independentemente do aumento do tamanho dos cristalitos ou da cristalinidade do material. Essa estabilidade é um fator positivo para futuras aplicações do  $Nb_2O_5$  em células solares sensibilizadas por corante e em outras aplicações fotovoltaicas emergentes.

Foram realizadas as análises de corrente em função do potencial, demonstrados na Figura 10.

**Figura 10 – Curvas de corrente por potencial (J-V) para a CSSCs produzidas com partículas de  $Nb_2O_5$  calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C**



Fonte: Autor (2024)

Como é possível observar na Figura 10, o dispositivo com maior densidade de corrente foi o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sintetizado a temperatura de 600 °C, apresentando uma maior área sob a curva. A eficiência de foto-conversão é calculada utilizando os dados das curvas J-V empregando a equação 3, em que J<sub>sc</sub> representa densidade de corrente, V<sub>oc</sub> o potencial de circuito aberto, FF fator de forma, P a potência incidente e por fim o η a eficiência (Longo; De Paoli, 2003):

$$\eta = \frac{J_{sc} * V_{oc} * FF}{P} * 100\% \quad (3)$$

Na tabela 3 encontram-se os parâmetros foto-eletróquímicos das CSSCs desenvolvidas.

**Tabela 3 - Parâmetros fotovoltaicos para CSSCs preparados com partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C**

Amostra	Densidade de corrente (mA cm <sup>-2</sup> )	Potencial de circuito aberto (V)	Fator de forma	Eficiência (%)
500 °C	3,19	0,738	0,481	1,13
600 °C	4,23	0,694	0,474	1,39
700 °C	1,36	0,751	0,536	0,55

Fonte: Autor (2025)

Analisando os resultados da Tabela 3, nota-se que a célula produzida com a rota térmica de 600 °C apresentou eficiência mais alta quando comparada as demais células, equivalente a um η = 1,39%. Isto deve-se ao fato principalmente pela alta densidade de corrente produzida pelo sistema. Corroborando com as técnicas anteriores, a alta área superficial sugere-se ser o fator predominante para as eficiências encontradas, visto que os sistemas produzidos com temperaturas de 500 °C e 700 °C apresentaram eficiências reduzidas (η = 1,13% e η = 0,55% respectivamente) (Wu *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2018).

Apesar do óxido de 700 °C possuir um maior fator de forma (0,536), o mesmo possui um maior valor de cristalito equivalente a 18,51 nm, que pode estar relacionado com a menor eficiência encontrada (0,55%). Já para a célula produzida com o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sintetizado a 500 °C é verificado comportamento intermediário, alcançando seu valor de 1,13% de eficiência (Wu *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2018).

Esses resultados são promissores, considerando que substitutos de óxidos para o TiO<sub>2</sub> raramente alcançam eficiências mais elevadas. Por exemplo, o SnO<sub>2</sub> em forma nanoparticulada normalmente exhibe eficiências em torno de 0,9% (Ramamany;

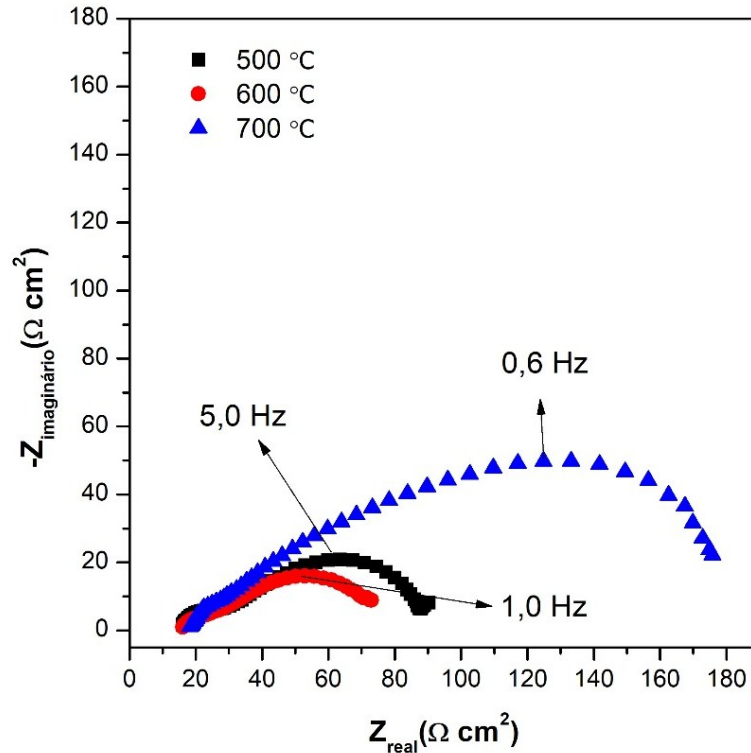
Lee, 2010), enquanto o ZnO atinge aproximadamente 0,57% (Valerio *et al.*, 2019). De forma similar, os óxidos desenvolvidos e estudados aqui podem funcionar como potenciadores para as camadas subjacentes de outros materiais, criando um efeito sinérgico. Para efeito de comparação a tabela 4 traz um comparativo com outros sistemas de CSSCs.

**Tabela 4 – Comparação entre CSSCs com diferentes óxidos semicondutores**

<b>Óxido semicondutor</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Fonte</b>
TiO <sub>2</sub>	4,67	Tractz (2022)
SnO <sub>2</sub>	0,9	Ramasamy; Lee (2010)
ZnO	0,57	Valerio <i>et al.</i> (2019)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 500 °C	1,13	Autor (2025)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 600 °C	1,39	Autor (2025)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 700 °C	0,66	Autor (2025)

Ressalta-se também que os sistemas desenvolvidos neste estudo não incluem uma camada bloqueadora de elétrons utilizando TiCl<sub>4</sub>, nem um mecanismo de vedação eficiente, se comparados a célula de TiO<sub>2</sub> citado na tabela 4, fatores que poderiam potencializar os parâmetros obtidos. Para se obter uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos envolvidos nos processos de transferência de carga e recombinação de elétrons na célula solar, é fundamental examinar não apenas a performance global por meio das curvas J-V, mas também a dinâmica das interfaces internas do dispositivo (Yang *et al.*, 2014). Nesse contexto, a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foi aplicada, conforme demonstrado na Figura 11.

**Figura 11 - Diagrama de Nyquist para CSSCs produzidas com partículas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C**



Fonte: Autor (2025)

A análise das curvas de impedância eletroquímica (EIS) realizadas no sistema de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sensibilizado por corante, conforme demonstrado na Figura 11, revelou informações cruciais sobre os processos de transferência de carga e recombinação que ocorrem nas interfaces da célula solar (Bard; Faulkner, 2001). O diagrama de Nyquist apresentado na Figura 11 destaca a presença de um arco capacitivo em altas frequências, relacionado ao comportamento do contra-eletrodo, o qual responde a tempos de relaxamento curtos (Guimaraes *et al.*, 2013). Esse comportamento é típico de sistemas sensibilizados por corante, nos quais a transferência de carga ocorre de forma rápida nas interfaces do dispositivo.

Além disso, observa-se um comportamento capacitivo distinto em altas frequências, com variações associadas à temperatura de calcinação do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Esse fenômeno corrobora a hipótese de que o processo de calcinação influencia diretamente os processos de transferência de carga que ocorrem na interface do eletrodo de trabalho (Liberatore *et al.*, 2009). A alteração do arco capacitivo à medida que a temperatura de calcinação aumenta é uma indicação clara de que a microestrutura do material e suas características superficiais estão sendo modificadas, afetando o comportamento de transferência de carga no sistema.

Especificamente, para os sistemas produzidos a temperaturas de calcinação de 600 °C, foram observados alta condutividade e facilidade nas reações redox, em comparação com os outros sistemas. Esses resultados são consistentes com os dados eletroquímicos obtidos para a corrente da célula, os quais indicam maior eficiência nas reações redox e uma redução significativa na resistência do sistema.

Essa melhoria nas propriedades de transporte de carga pode ser atribuída à formação de uma estrutura mais favorável à condução elétrica, possivelmente decorrente de uma maior ativação da superfície e melhor organização cristalina do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calcinado a 600 °C (Hagfeldt *et al.*, 2010).

Por outro lado, o óxido produzido a 500 °C apresentou resistências intermediárias, evidenciando um desempenho menos eficiente se comparado ao sistema calcinado a 600 °C. Isso sugere que a temperatura de calcinação de 500 °C não favorece a formação de características microestruturais ideais para a transferência de carga, resultando em um comportamento eletroquímico menos eficiente. De forma similar, o sistema calcinado a 700 °C apresentou altas resistências, o que indica uma redução na eficiência da transferência de carga, possivelmente devido ao maior tamanho dos cristalitos, que pode afetar a formação de defeitos na estrutura e dificultar as reações redox (Hagfeldt *et al.*, 2010).

Utilizando a Equação 4, é possível calcular  $\tau_e$ , o tempo de vida dos elétrons (com  $f$  representando a frequência do semicírculo intermediário) (Taques Tractz *et al.*, 2021; Tractz *et al.*, 2020).

$$\tau_e = \frac{1}{2 * \pi * f} \quad (4)$$

Os resultados de  $\tau_e$  indicam que o tempo de vida dos elétrons aumenta com o aumento da temperatura de calcinação. Para o sistema calcinado a 500 °C, o tempo de vida eletrônico é de 0,031 s, o que reflete uma recombinação rápida dos portadores de carga. Em contraste, o sistema calcinado a 600 °C apresenta um tempo de vida eletrônico de 0,159 s, indicando uma recombinação mais lenta e, portanto, uma maior eficiência na transferência de carga.

O sistema calcinado a 700 °C, com  $\tau_e$  de 0,265 s, sugere uma recombinação ainda mais lenta; contudo, conforme evidenciado nas curvas de impedância, essa melhoria não é acompanhada por um aumento na eficiência global do sistema, devido ao incremento das resistências associadas a esse processo de calcinação (Bisquert; Fabregat-Santiago, 2010; Wang; Moser; Grätzel, 2005).

Estes dados confirmam que a temperatura de calcinação é um parâmetro crítico na modulação das propriedades eletroquímicas do sistema de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  sensibilizado por corante. A análise de impedância e do tempo de vida dos elétrons fornece uma compreensão detalhada dos mecanismos de transporte de carga e dos efeitos da temperatura de calcinação nas interfaces das células solares.

Esses resultados não apenas contribuem para o avanço do conhecimento científico na área de materiais e materiais aplicados em CSSCs, mas também oferecem dados valiosos para a otimização de processos de síntese, potencializando o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Portanto, este estudo representa um passo significativo na busca por soluções energéticas inovadoras e viáveis.

## 6 CONCLUSÃO

Óxidos de nióbio foram eficientemente sintetizados, via metodologia Pechini, com variação na temperatura de queima. As imagens de MEV confirmaram a presença de aglomerados pequenos e em formato irregular para todas as amostras, que em conjunto com a técnica de espalhamento dinâmico de luz, mostrou um menor raio hidrodinâmico (642,17 nm) para a partícula sinterizada a 600 °C.

As análises de DRX mostraram picos característicos da fase ortorrômbica para o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com tamanho de cristalito de 12,26 nm, 14,39 nm e 18,51 nm para os pós sinterizados a 500 °C, 600 °C e 700 °C respectivamente.

Quando aplicado em uma célula solar sensibilizada por corante (CSSCs), os melhores resultados eletroquímicos foram observados na amostra de 600 °C, que apresentou a maior densidade de corrente (4,23 mA cm<sup>-2</sup>) e a melhor eficiência (1,39%), com um tempo de vida eletrônico de 0,139 s. Esses resultados comprovam que a temperatura de 600 °C oferece o melhor equilíbrio entre morfologia, estrutura cristalina e desempenho eletroquímico, favorecendo maior adsorção de corante e transporte de elétrons. Isso destaca a importância do controle térmico na síntese de óxidos para CSSCs.

Em síntese, os resultados encontrados neste trabalho reforçam o potencial de materiais alternativos ao silício, com síntese mais econômica e eficiente, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas mais sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. L. **Modelamento elétrico de células solares sensibilizadas por corante**. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- ASSIS, F. G., Santos, V. S., & De Oliveira, J. L. **Sustentabilidade na mineração: avaliação e mitigação de impactos ambientais na extração do nióbio em Minas Gerais**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 50, n. 3, p. 479-493, 2020.
- BARBERO, N.; SANTATO, C. **Dye-sensitized solar cells: from genesis to recent drifts**. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 1863-1884, 2013. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/6/6/1863>.
- BARD, Allen J.; FAULKNER, Larry R. **Electrochemical methods: fundamentals and applications**. 2. ed. New York: Wiley, 2001.
- BHAGAT, A. K.; KUMAR, A. **A narrative review on vital criteria of fungal dyes as dye-sensitized solar cell (DSSC)**. *Discover Applied Sciences*, [S.l.], v. 5, art. 62, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-06256-8>. Acesso em: 13 jul. 2025.
- BISQUERT, Juan; FABREGAT-SANTIAGO, Francisco. Impedance Spectroscopy: A General Introduction and Application to Dye-Sensitized Solar Cells. **Dye-Sensitized Solar Cells**, p. 457–554, 1 jan. 2010.
- BRUZIQUESI, Carlos G. O. *et al.* Niobium: A strategic chemical element for Brazil. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1184–1188, 1 out. 2019.
- CORREIA, Evandro De Sousa; DANTAS, Jeânderson De Melo; ANDRADE, José Elisandro de. Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar da teoria de bandas de energia. **Scientia Plena**, v. 13, n. 1, 13 jan. 2017.
- COSTA, A. C. F. M. *et al.* Síntese e caracterização de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. **Cerâmica**, v. 52, n. 324, p. 255–259, out. 2006.
- DIAS, Bianca V *et al.* Photoelectrochemical Behavior of the Cell FTO/TiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub>/N719 Obtained from the Pechini and Precipitation of Cerium Oxide Methods. **Journal of Electronic Materials**, v. 47, n. 9, p. 5556–5563, 2018.
- DRUMM, Fernanda Caroline *et al.* Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 2014.
- FUZIKI, M.E.K. *et al.* **N-Doped TiO<sub>2</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Sol-Gel Catalysts: Synthesis, Characterization, Adsorption Capacity, Photocatalytic and Antioxidant Activity**. *Catalysts*, v. 13, p. 1233, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal13091233>.

GIELEN, D. *et al.* The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38-50, 2019.

GONG, Xianyun; *et al.* **An overview of bi-layered niobium pentoxide (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-based photoanodes for dye-sensitized solar cells.** *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023.

GRÄTZEL, M. Dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 4, n. 2, p. 145-153, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389556703000261>.

GUIMARAES, Robson R. *et al.* New tunable ruthenium complex dyes for TiO<sub>2</sub> solar cells. **Inorganica Chimica Acta**, v. 404, p. 23–28, 1 ago. 2013.

HAGFELDT, Anders *et al.* Dye-Sensitized Solar Cells. **Chemical Reviews**, v. 110, n. 11, p. 6595–6663, 10 nov. 2010.

HOWARTH, R. W. A bridge to nowhere: Methane emissions and the greenhouse gas footprint of natural gas. **Energy Science & Engineering**, v. 2, n. 2, p. 47-60, 2014.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2021. **International Renewable Energy Agency**, 2022.

JARZYNSKA, Kamila *et al.* Understanding the zeta potential of nanomaterials through predictive nanoinformatics. **Nano Today**, v. 64, p. 102783, 1 out. 2025.

JERNELÖV, A. The threats from oil spills: Now, then, and in the future. **Ambio**, v. 39, n. 5-6, p. 353-366, 2010.

JIN, X., Wang, J., & Li, X. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanomaterials: synthesis, properties, and applications in dye-sensitized solar cells. **Journal of Nanomaterials**, 2015, p. 1-15.

KANT, Neeraj; SINGH, Pushpendra. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 3460–3470, 1 jan. 2022.

KIM, Tae Young *et al.* Adsorption and kinetics properties of TiO<sub>2</sub> photoelectrode using natural paprika oleoresin (*Capsicum annuum* L.) dye for dye-sensitized solar cells. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 13, n. 4, p. 3935–3947, 1 abr. 2018.

KONWAR, Subhrajit *et al.* Stable efficient solid-state supercapacitors and dye-sensitized solar cells using ionic liquid-doped solid biopolymer electrolyte. **ACS Omega**, v. 9, n. 38, p. 39696–39702, 12 set. 2024. DOI:10.1021/acsomega.4c04815.

LEE, K. M.; LEE, H. Y.; YU, K. L. Improved Performance of Dye-Sensitized Solar Cells by using Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> Hybrid Electrodes. **Journal of Power Sources**, v. 274, p. 1266-1270, 2015.

LIBERATORE, M. *et al.* Using EIS for diagnosis of dye-sensitized solar cells performance. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 39, n. 11, p. 2291–2295, 2009.

LIU, Y.; YANG, S.; LI, Y. Influence of calcination temperature on the properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanopowders synthesized by Pechini method. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 121, 2021. DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105421.

LONGO, C.; DE PAOLI, M.-A. Dye-sensitized solar cells: a successful combination of materials. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 14, n. 6, p. 898–901, nov. 2003.

MODIS, Theodore. **Forecasting the Mix of World Energy Needs by mid-21 st Century**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.19873>.

OLIVEIRA, D. P., & De Lima, E. M. (2019). **A extração do nióbio e os impactos ambientais associados: uma revisão**. Geologia USP. Série Científica, 19(2), 101-113.

O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A Low-cost, High-efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO<sub>2</sub> Films. **Nature**, v. 353, p. 737-740, 1991.

PARUSSULO, A. L. A. **Conceitos supramoleculares e morfologia interfacial em células solares de TiO<sub>2</sub>**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo 2013.

PECHINI, **Maggio P. Method of preparing lead and alkaline earth titanates and niobates and coating method using the same to form a capacitor**. [S.l.]: U.S Patent No. 3330697, 1967

RABA, Angela M.; BAUTISTA-RUÍZ, Jorge; JOYA, Miryam R. Synthesis and structural properties of niobium pentoxide powders: a comparative study of the growth process. **Materials Research**, São Carlos, v. 19, n. 6, p. 1381–1387, nov./dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0733>.

RAMASAMY, Easwaramoorthi; LEE, Jinwoo. Ordered Mesoporous SnO<sub>2</sub>-Based Photoanodes for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 114, n. 50, p. 22032–22037, 23 dez. 2010.

RANI, et al. **Highly ordered Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanochannel films for DSSC application**. *J. Phys. Chem. C*, 2014.

REN21. (2022). **Renewables 2022 Global Status Report**. REN21 Secretariat, Paris.

SONAI, G. G. *et al* (2015). Células solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. **Química Nova**, 38(10), 1357–1365. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150148>

TAGLIAFERRO, G. V.; DA SILVA, M. L. C. P.; DA SILVA, G. L. J. P. Síntese e processamento de pentóxido de nióbio e óxidos mistos de nióbio e titânio nanoparticulados e estudo de suas propriedades fotocatalíticas. **Quim. Nova**, v. 28, p. 250, 2005.

**TANB.** Applications for niobium. Disponível em: <https://www.tanb.org/about-niobium/applications-for-niobium>.

TAVARES, L. M. M. (2017). Nióbio: um estudo sobre o mercado e a influência do Brasil. **Revista de Administração e Inovação**, 14(2), 137-149.

TOLMASQUIM, M. T., Guerreiro, A., & Gorini, R. (2007). Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos CEBRAP**, (79), 47–69.  
<https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000300003>

TRACTZ, G. T.; BOSCHEN, N. L.; RODRIGUES, P. R. P. Synthesis and application of TiO<sub>2</sub> in solar cells: Analysis of proportion of titanium isopropoxide. **Cerâmica**, v. 67, n. 381, p. 83–89, 1 jan. 2021.

TRACTZ, Gideã T. *et al.* Dye sensitized solar cells (CSSC): Perspectives, materials, functioning and characterization techniques. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 3, p. 748–774, 2020.

TRACTZ, Gideã Taques *et al.* Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> synthesis and characterization by Pechini method to the application as electron transport material in a solar device. **Solar Energy**, v. 216, p. 1–6, 1 mar. 2021.

TRACTZ, Gideã Taques. **Óxidos de TiO<sub>2</sub> dopados com Nb: síntese e aplicação em células fotovoltaicas de terceira geração**. 2022. 127 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Guarapuava, 2022.

VALERIO, Tatiana Lima *et al.* Study of the Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Insertion in ZnO to Dye-sensitized Solar Cells. **Materials Research**, v. 22, 2019.

WANG, Qing; MOSER, Jacques-E.; GRÄTZEL, Michael. Electrochemical Impedance Spectroscopic Analysis of Dye-Sensitized Solar Cells. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 109, n. 31, p. 14945–14953, 1 ago. 2005.

WU, Jih-Jen *et al.* Effects of dye adsorption on the electron transport properties in ZnO-nanowire dye-sensitized solar cells. **Applied Physics Letters**, v. 90, n. 21, p. 213109, 23 maio 2007.

YANG, Jun Hyuk *et al.* Characteristics of the dye-sensitized solar cells using TiO<sub>2</sub> nanotubes treated with TiCl<sub>4</sub>. **Materials**, v. 7, n. 5, p. 3522–3532, 2014.

ZHANG, Shan; WANG, Chao. Precise Analysis of Nanoparticle Size Distribution in TEM Image. **Methods and Protocols**, v. 6, n. 4, 1 ago. 2023.

ZHOU, D.; YU, L.; XU, T. Hydrothermal Synthesis and Photovoltaic Properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Nanorod Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells. **Electrochimica Acta**, v. 87, p. 536-542, 2013.

ZHOU, H. *et al.* Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanopowders synthesized by a Pechini-type method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 575, p. 175-182, 2013.

ZULEHNER, W. Czochralski growth of silicon. *Journal Of Crystal Growth*, [S.L.], v. 65, n. 1-3, p. 189-213, dez. 1983. **Elsevier BV**. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248\(83\)90051-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248(83)90051-9).