REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

ENGENHARIA FUNCIONAL DO SnO_2 COM HAN BLUE ($BaCuSi_4O_{10}$): PROPRIEDADES ÓPTICAS E DESEMPENHO FOTOVOLTAICO

FUNCTIONAL ENGINEERING OF SnO_2 WITH HAN BLUE ($BaCuSi_4O_{10}$): OPTICAL PROPERTIES AND PHOTOVOLTAIC PERFORMANCE

INGENIERÍA FUNCIONAL DEL SnO_2 CON AZUL HAN ($BaCuSi_4O_{10}$): PROPIEDADES ÓPTICAS Y RENDIMIENTO FOTOVOLTAICO

Felipe Rodrigues da Silva
Doutorando, Laboratório de Filmes Finos em Energias Renováveis (LAFFER), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil
E-mail: prof.feliperodrigues18@gmail.com
Orcid: 0000-0003-1224-8364

Rodrigo Franco Cavalcante
Mestre em Engenharia de Telecomunicações
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Fortaleza, CE, Brasil
E-mail: rfcavalcante2009@gmail.com
Orcid: 0009-0009-7133-6891

João Dionízio de Melo Neto
Doutorando, Laboratório de Filmes Finos em Energias Renováveis (LAFFER), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil
E-mail: Joao.dionizio@ifce.edu.br
Orcid: 0000-0003-1054-0257

José Souto Sarmento
Doutor, Grupo de Química de Materiais Avançados (GQMat), Departamento de Química Analítica e Físico-Química, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil
E-mail: josesoutosarmento@gmail.com
Orcid: 0009-0003-1161-4999

Handerson José dos Prazeres
Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil
E-mail: fisicahanderson@gmail.com

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Orcid: 0009-0005-5583-3629

William Neves da Silva
Doutorando, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil
E-mail: williamrns88@gmail.com
Orcid: 0000-0002-4731-095X

Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Doutor, Laboratório de Filmes Finos em Energias Renováveis (LAFFER), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil
E-mail: nivaldo@ufc.br
Orcid: 0000-0001-5449-2635

Resumo

Este trabalho investigou a modificação de fotoânodos de dióxido de estanho (SnO_2) com 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), conhecido como Azul Han, visando sua aplicação em células solares sensibilizadas por corante (DSSCs). Os materiais e os fotoânodos foram avaliados por espectroscopia Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), espectroscopia UV–Vis–NIR e caracterização fotovoltaica por curvas de densidade de corrente–tensão (J–V). A caracterização Raman do BCSO revelou bandas vibracionais características, com sinais intensos em aproximadamente 423 e 1102 cm^{-1}, enquanto a análise por EDS confirmou a presença de Ba, Cu, Si e O. As micrografias mostraram que tanto o SnO_2 puro quanto o sistema contendo 5% de BCSO apresentam superfícies rugosas, porosas e constituídas por partículas aglomeradas, preservando características morfológicas favoráveis à interação entre fotoânodo, sensibilizador e eletrólito. As análises ópticas evidenciaram alterações na resposta espectral após a incorporação do BCSO, particularmente na região visível. O desempenho fotovoltaico aumentou após a modificação: a densidade de corrente de curto-circuito (Jsc) passou de 6,10 para 8,05 mA cm^{-2}, correspondendo a um incremento de aproximadamente 32%, enquanto a tensão de circuito aberto (Voc) permaneceu praticamente inalterada, passando de 0,504 para 0,508 V. O fator de preenchimento (FF) aumentou de 0,42 para 0,56 e a eficiência de conversão de potência (η) passou de 1,30% para 2,31%, correspondendo a um aumento relativo de aproximadamente 78% para o melhor dispositivo. Esses resultados indicam que a incorporação de uma pequena quantidade de $BaCuSi_4O_{10}$ constitui uma estratégia promissora para modificar as propriedades ópticas e melhorar o desempenho fotovoltaico de sistemas baseados em SnO_2.

Palavras-chave: $BaCuSi_4O_{10}$; SnO_2; Azul Han; desempenho fotovoltaico; DSSCs.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Abstract

This work investigated the modification of tin dioxide (SnO_2) photoanodes with 5 wt.% $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), commonly known as Han Blue, for application in dye-sensitized solar cells (DSSCs). The materials and photoanodes were evaluated by Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), UV–Vis–NIR spectroscopy, and photovoltaic characterization through current density–voltage (J–V) measurements. Raman characterization of BCSO revealed characteristic vibrational bands, with intense signals at approximately 423 and 1102 cm^{-1}, while EDS analysis confirmed the presence of Ba, Cu, Si, and O. The micrographs showed that both pristine SnO_2 and the system containing 5 wt.% BCSO exhibited rough and porous surfaces composed of agglomerated particles, preserving morphological characteristics favorable for interactions among the photoanode, sensitizer, and electrolyte. Optical measurements revealed changes in the spectral response after BCSO incorporation, particularly in the visible region. Photovoltaic performance increased after modification: the short-circuit current density (Jsc) rose from 6.10 to 8.05 mA cm^{-2}, corresponding to an increase of approximately 32%, while the open-circuit voltage (Voc) remained nearly unchanged, increasing from 0.504 to 0.508 V. The fill factor (FF) increased from 0.42 to 0.56, and the power conversion efficiency (η) increased from 1.30% to 2.31%, corresponding to a relative enhancement of approximately 78% for the best-performing device. These results indicate that incorporating a small amount of $BaCuSi_4O_{10}$ is a promising strategy for modifying the optical properties and improving the photovoltaic performance of SnO_2-based systems.

Keywords: $BaCuSi_4O_{10}$; SnO_2; Han Blue; photovoltaic performance; DSSCs.

Resumen

Este trabajo investigó la modificación de fotoánodos de dióxido de estaño (SnO_2) con 5% en masa de $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), conocido como Azul Han, para su aplicación en células solares sensibilizadas por colorante (DSSCs). Los materiales y los fotoánodos fueron evaluados mediante espectroscopía Raman, microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS), espectroscopía UV–Vis–NIR y caracterización fotovoltaica mediante curvas de densidad de corriente–voltaje (J–V). La caracterización Raman del BCSO reveló bandas vibracionales características, con señales intensas en aproximadamente 423 y 1102 cm^{-1}, mientras que el análisis por EDS confirmó la presencia de Ba, Cu, Si y O. Las micrografías mostraron que tanto el SnO_2 puro como el sistema que contiene 5% de BCSO presentan superficies rugosas, porosas y constituidas por partículas aglomeradas, preservando características morfológicas favorables para la interacción entre el fotoánodo, el sensibilizador y el electrolito. Los análisis ópticos evidenciaron modificaciones en la respuesta espectral después de la incorporación del BCSO, particularmente en la región visible. El rendimiento fotovoltaico aumentó tras la modificación: la densidad de corriente de cortocircuito (Jsc) pasó de 6,10 a 8,05 mA cm^{-2}, correspondiente a un

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

incremento de aproximadamente 32%, mientras que el voltaje de circuito abierto (Voc) permaneció prácticamente inalterado, pasando de 0,504 a 0,508 V. El factor de llenado (FF) aumentó de 0,42 a 0,56 y la eficiencia de conversión de potencia (η) pasó de 1,30% a 2,31%, correspondiente a un incremento relativo de aproximadamente 78% para el dispositivo de mejor rendimiento. Estos resultados indican que la incorporación de una pequeña cantidad de $BaCuSi_4O_{10}$ constituye una estrategia prometedora para modificar las propiedades ópticas y mejorar el rendimiento fotovoltaico de sistemas basados en SnO_2.

Palabras clave: $BaCuSi_4O_{10}$; SnO_2; Azul Han; rendimiento fotovoltaico; DSSCs.

1. Introdução

A crescente demanda energética mundial e a necessidade de reduzir os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas baseadas em materiais de baixo custo e processos de fabricação simplificados. Nesse contexto, as células solares sensibilizadas por corante (*Dye-Sensitized Solar Cells* – DSSCs) constituem uma alternativa relevante entre as tecnologias fotovoltaicas de terceira geração, principalmente devido à relativa simplicidade de fabricação, possibilidade de utilização de diferentes materiais semicondutores e desempenho sob condições de iluminação difusa (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991; HAGFELDT et al., 2010; YE et al., 2015; KORIR et al., 2024).

O funcionamento das DSSCs baseia-se na absorção da radiação incidente por um sensibilizador molecular adsorvido sobre a superfície de um semicondutor de ampla banda proibida. Após a fotoexcitação, elétrons são injetados do estado excitado do corante para a banda de condução do semicondutor e posteriormente transportados até o substrato condutor e o circuito externo. O corante oxidado é regenerado pelo eletrólito redox, enquanto o circuito é completado no contraeletrodo. Nesse processo, o fotoânodo exerce papel fundamental, pois atua simultaneamente como suporte para a adsorção do sensibilizador e como meio de transporte e coleta dos elétrons fotoinjetados. Consequentemente, características como estrutura cristalina, porosidade, área superficial, propriedades ópticas, posição das bandas de energia e dinâmica de recombinação influenciam

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

diretamente o desempenho fotovoltaico da célula (HAGFELDT et al., 2010; QUINTANA et al., 2014; YE et al., 2015).

Embora o TiO_2 seja o semicondutor mais amplamente empregado em fotoânodos de DSSCs, outros óxidos têm sido investigados com o objetivo de otimizar o transporte eletrônico e desenvolver novas arquiteturas de dispositivos. Entre esses materiais, o dióxido de estanho (SnO_2) apresenta características particularmente interessantes, incluindo elevada estabilidade química e térmica, alta transparência óptica, ampla banda proibida e elevada mobilidade eletrônica. A maior mobilidade dos elétrons no SnO_2 pode favorecer seu transporte através do fotoânodo, tornando esse semicondutor uma alternativa relevante para dispositivos fotovoltaicos sensibilizados por corante (WALI; JOSE, 2019; WANG; JIA; ZHONG, 2024; KHAIRUDIN et al., 2026).

Apesar dessas vantagens, fotoânodos constituídos exclusivamente por SnO_2 apresentam limitações importantes. A posição energeticamente mais baixa de sua banda de condução em comparação com a do TiO_2 tende a produzir menores valores de tensão de circuito aberto (Voc), enquanto processos de recombinação na interface semicondutor/corante/eletrólito podem comprometer a coleta eficiente das cargas fotogeradas. Além disso, a afinidade superficial pelo sensibilizador e a microestrutura do filme podem exercer forte influência sobre a quantidade de corante adsorvido e, consequentemente, sobre a densidade de fotocorrente obtida. Essas limitações têm motivado estratégias de modificação do SnO_2 por meio da formação de compósitos, revestimentos, heteroestruturas e incorporação de materiais funcionalmente ativos (WALI; JOSE, 2019; KORIR et al., 2024; KHAIRUDIN et al., 2026).

Entre os materiais com potencial para essa finalidade encontra-se o tetrassilicato de bário e cobre, $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), historicamente conhecido como azul Han (*Han blue*). Esse material pertence à família dos tetrassilicatos de cobre alcalino-terrosos $ACuSi_4O_{10}$ (A = Ca, Sr, Ba) e apresenta uma estrutura caracterizada por cromóforos Cu^{2+} em coordenação aproximadamente quadrado-planar associados à rede de silicatos. Além de sua elevada estabilidade físico-química, o $BaCuSi_4O_{10}$ apresenta propriedades ópticas particulares, incluindo

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

absorção na região visível e intensa emissão no infravermelho próximo associada aos centros Cu^{2+}, características que têm despertado interesse em aplicações fotônicas e optoeletrônicas além de seu uso histórico como pigmento (JOHNSON-MCDANIEL et al., 2014; CHEN et al., 2014; LI et al., 2015; LIU et al., 2018).

Estudos envolvendo $BaCuSi_4O_{10}$ demonstram que suas propriedades ópticas estão intimamente relacionadas ao ambiente cristalino dos íons Cu^{2+}. O material pode apresentar absorção óptica em uma ampla região do espectro e emissão no infravermelho próximo, aproximadamente entre 800 e 1200 nm, dependendo das características estruturais e das condições de excitação (LI et al., 2015; LIU et al., 2018; LIU et al., 2023). Essas características tornam particularmente interessante investigar sua integração com semicondutores de ampla banda proibida. No contexto de DSSCs, a incorporação controlada de BCSO ao SnO_2 pode modificar a interação da radiação com o fotoânodo, sua microestrutura e as interfaces responsáveis pelo transporte de carga. Entretanto, a aplicação específica do $BaCuSi_4O_{10}$ como modificador de fotoânodos de SnO_2 para DSSCs permanece pouco explorada, estabelecendo uma oportunidade para investigar a relação entre as características estruturais, morfológicas e ópticas desse sistema e sua resposta fotovoltaica.

Além da composição do fotoânodo, o método empregado na preparação do filme influencia sua espessura, uniformidade, porosidade e aderência ao substrato condutor. A técnica *Doctor Blade* é amplamente empregada na fabricação de eletrodos particulados para DSSCs devido à simplicidade experimental, baixo desperdício de material e possibilidade de controlar aproximadamente a espessura da camada por meio de espaçadores e das características reológicas da pasta. A técnica também apresenta potencial de escalabilidade e permite a deposição de filmes sobre substratos condutores transparentes, tornando-se adequada à preparação de fotoânodos baseados em óxidos semicondutores e materiais compósitos (ITO et al., 2007; KHAIRUDIN et al., 2026).

Diante desse contexto, o presente trabalho investiga fotoânodos de SnO_2 modificados com 5% de $BaCuSi_4O_{10}$, preparados pela técnica *Doctor Blade*, para aplicação em células solares sensibilizadas por corante. O estudo busca

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

correlacionar as características estruturais, vibracionais, morfológicas e ópticas do sistema SnO_2/BCSO com seu comportamento fotovoltaico, utilizando espectroscopia Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), espectroscopia UV–Vis e medidas de densidade de corrente em função da tensão (J–V). A comparação entre fotoânodos de SnO_2 puro e SnO_2 contendo 5% de BCSO permite avaliar a influência da incorporação do tetrassilicato sobre a resposta óptica e os parâmetros fotovoltaicos das DSSCs, contribuindo para a investigação de pigmentos cerâmicos funcionais como modificadores de fotoânodos semicondutores.

2. Revisão da Literatura

2.1 Células solares sensibilizadas por corante e o papel do fotoânodo

As células solares sensibilizadas por corante (*Dye-Sensitized Solar Cells* – DSSCs) constituem dispositivos fotoeletroquímicos nos quais as funções de absorção da radiação, transporte eletrônico e regeneração das espécies oxidadas são realizadas por diferentes componentes. A configuração convencional é formada por um fotoânodo semicondutor mesoporoso depositado sobre um substrato condutor transparente, um corante sensibilizador adsorvido à superfície do semicondutor, um eletrólito contendo um par redox e um contraeletrodo catalítico (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991; HAGFELDT et al., 2010).

Quando a radiação incidente é absorvida pelo sensibilizador, ocorre a promoção de elétrons do estado fundamental para estados eletronicamente excitados. Se o alinhamento energético entre o sensibilizador e o semicondutor for favorável, esses elétrons são injetados na banda de condução do óxido e posteriormente transportados através da rede de partículas até o substrato condutor. Após percorrerem o circuito externo, os elétrons chegam ao contraeletrodo, onde participam da redução das espécies do eletrólito. Paralelamente, o eletrólito regenera o corante oxidado, completando o ciclo fotoeletroquímico (HAGFELDT et al., 2010; YE et al., 2015).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Nesse mecanismo, o fotoânodo desempenha papel determinante no desempenho da DSSC. Uma estrutura porosa e com elevada área superficial favorece a adsorção de uma maior quantidade de moléculas do sensibilizador, enquanto uma rede semicondutora eletronicamente conectada é necessária para transportar eficientemente os elétrons fotoinjetados. Entretanto, o aumento da área interfacial também pode favorecer processos de recombinação entre elétrons presentes no semicondutor e espécies oxidadas do eletrólito. Dessa forma, o desempenho final resulta de um equilíbrio entre absorção de luz, injeção eletrônica, transporte de carga, recombinação e regeneração do sensibilizador (HAGFELDT et al., 2010; WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

Os principais parâmetros empregados na avaliação fotovoltaica das DSSCs são a densidade de corrente de curto-circuito (Jsc), a tensão de circuito aberto (Voc), o fator de preenchimento (FF) e a eficiência de conversão de potência (η). O Jsc está relacionado, entre outros fatores, à quantidade de fótons efetivamente convertidos em portadores de carga e à eficiência de coleta desses elétrons. O Voc depende da diferença entre o nível quase-Fermi dos elétrons no semicondutor sob iluminação e o potencial redox do eletrólito, sendo também fortemente influenciado pelos processos de recombinação. O FF expressa a qualidade da curva J–V, enquanto η representa a fração da potência luminosa incidente convertida em potência elétrica (HAGFELDT et al., 2010; YE et al., 2015).

2.2. SnO_2 como material para fotoânodos de DSSCs

O dióxido de estanho (SnO_2) é um semicondutor do tipo n que apresenta estrutura cristalina tetragonal do tipo rutilo, também denominada cassiterita. Suas propriedades incluem elevada estabilidade química e térmica, transparência óptica, ampla banda proibida e elevada mobilidade eletrônica, características que justificam seu emprego em sensores, dispositivos optoeletrônicos e sistemas fotovoltaicos. Particularmente em DSSCs, sua elevada mobilidade eletrônica constitui uma vantagem potencial para o transporte das cargas fotoinjetadas através do fotoânodo (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015; WALI; JOSE, 2019).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Em comparação com o TiO_2, o SnO_2 apresenta mobilidade eletrônica significativamente superior, característica que pode favorecer o transporte dos elétrons e diminuir limitações associadas à difusão através da camada particulada. Além disso, sua elevada transparência na região visível possibilita que grande parte da radiação alcance as moléculas sensibilizadoras adsorvidas na superfície do material. Essas propriedades fazem do SnO_2 um candidato relevante para o desenvolvimento de fotoânodos alternativos para DSSCs (WALI; JOSE, 2019).

Entretanto, as vantagens relacionadas ao transporte eletrônico não se traduzem automaticamente em maior eficiência fotovoltaica. Um dos principais fatores limitantes do SnO_2 é a posição relativamente baixa da borda de sua banda de condução. Essa característica tende a reduzir o nível quase-Fermi eletrônico sob iluminação e, consequentemente, pode resultar em menores valores de Voc quando comparado a semicondutores como o TiO_2. Além disso, a transferência de elétrons do SnO_2 para espécies oxidadas presentes no eletrólito pode aumentar as perdas por recombinação (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

Outra característica relevante está relacionada à química superficial do SnO_2. Seu ponto isoelétrico é inferior ao observado para o TiO_2, podendo resultar em menor afinidade por determinados corantes sensibilizadores e, consequentemente, menor quantidade de corante adsorvido. Como a densidade de fotocorrente depende diretamente da absorção da radiação pelo sensibilizador e da eficiência de injeção e coleta de elétrons, modificações capazes de alterar a superfície, a morfologia ou as interfaces do SnO_2 representam estratégias relevantes para melhorar o desempenho das células (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

Diversas abordagens vêm sendo investigadas para superar essas limitações, incluindo dopagem, controle morfológico, formação de heteroestruturas, estruturas *core-shell* e combinação do SnO_2 com outros materiais. Essas estratégias procuram aumentar a adsorção do sensibilizador, controlar o alinhamento energético e reduzir a recombinação eletrônica sem comprometer a elevada mobilidade característica do SnO_2 (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015; WALI; JOSE, 2019).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

2.3. $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO): estrutura e propriedades ópticas

O $BaCuSi_4O_{10}$, denominado neste trabalho BCSO e conhecido historicamente como azul Han (*Han blue*), pertence à família dos tetrassilicatos de cobre de metais alcalino-terrosos, $ACuSi_4O_{10}$, na qual A pode corresponder a Ca, Sr ou Ba. Esses compostos apresentam estruturas lamelares e propriedades ópticas associadas principalmente ao ambiente eletrônico dos íons Cu^{2+}. Embora tenham sido originalmente empregados como pigmentos, estudos contemporâneos demonstram que esses materiais apresentam propriedades fotofísicas relevantes para aplicações tecnológicas (JOHNSON-MCDANIEL et al., 2014; LI et al., 2015).

A estrutura do $BaCuSi_4O_{10}$ contém unidades de cobre associadas à rede de silicatos, nas quais os íons Cu^{2+} apresentam ambiente de coordenação que exerce influência direta sobre suas transições eletrônicas. Essas transições são responsáveis pela coloração característica do material e por sua interação com a radiação eletromagnética nas regiões visível e infravermelha próxima (LI et al., 2015).

Uma propriedade particularmente interessante do BCSO é sua luminescência no infravermelho próximo. Estudos envolvendo os silicatos $CaCuSi_4O_{10}$ e $BaCuSi_4O_{10}$ demonstraram emissão intensa e estável associada aos centros Cu^{2+}. Para o $BaCuSi_4O_{10}$, emissões próximas da região de 900–1000 nm têm sido reportadas, e essas propriedades podem ser preservadas mesmo após processos de redução dimensional e formação de nanofolhas (LI et al., 2015; SELVAGGIO et al., 2021; SELVAGGIO; KRUSS, 2022).

Além da emissão no infravermelho próximo, o BCSO apresenta absorção óptica associada às transições eletrônicas dos íons Cu^{2+}. Essa interação com a radiação torna interessante sua combinação com semicondutores de ampla banda proibida, nos quais a absorção intrínseca encontra-se predominantemente na região ultravioleta. Nesse sentido, materiais à base de silicatos de cobre podem atuar como componentes opticamente ativos em sistemas híbridos e compósitos.

No entanto, a presença de propriedades luminescentes ou de absorção no visível não implica necessariamente, por si só, melhoria do desempenho de uma

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

DSSC. Para que a incorporação do BCSO resulte em benefício fotovoltaico, fatores como sua concentração, distribuição no filme, interação com o SnO_2, influência sobre a adsorção do sensibilizador e possíveis alterações nos processos de transferência e recombinação de cargas devem ser considerados. Portanto, a avaliação experimental conjunta das propriedades estruturais, morfológicas, ópticas e fotovoltaicas é fundamental para compreender seu papel no fotoânodo.

2.4. Fotoânodos compósitos e incorporação de BCSO ao SnO_2

A utilização de fotoânodos compósitos representa uma estratégia para combinar propriedades complementares de diferentes materiais. No caso do SnO_2, a introdução de uma segunda fase pode modificar a microestrutura do filme, aumentar sua rugosidade, alterar a interação entre luz e matéria, modificar a interface semicondutor/corante e influenciar as rotas de transporte e recombinação eletrônica. Estudos anteriores demonstram que a modificação de SnO_2 por dopagem, revestimentos ou formação de compósitos pode produzir alterações significativas nos parâmetros Jsc, Voc, FF e η das DSSCs (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015; WALI; JOSE, 2019).

Nesse contexto, a incorporação de $BaCuSi_4O_{10}$ em uma matriz de SnO_2 apresenta interesse particular pela combinação entre as propriedades de transporte eletrônico do semicondutor e a resposta óptica característica do silicato de cobre. Em princípio, a presença do BCSO pode alterar a absorção e o espalhamento da radiação dentro da camada fotoativa, além de modificar sua morfologia superficial. Uma superfície rugosa e porosa pode favorecer uma maior área de contato com o sensibilizador e o eletrólito, embora uma quantidade excessiva de uma segunda fase possa interromper caminhos de transporte eletrônico ou introduzir novos centros de recombinação.

Por esse motivo, a concentração do material incorporado representa um parâmetro fundamental. No presente sistema, a utilização de 5% de BCSO busca preservar uma matriz predominantemente constituída por SnO_2, mantendo suas propriedades de transporte eletrônico, enquanto introduz uma quantidade suficiente

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

do silicato para promover alterações detectáveis nas propriedades morfológicas e ópticas do fotoânodo. A comparação direta com SnO_2 puro permite avaliar experimentalmente se essas alterações produzem efeitos favoráveis sobre a resposta fotovoltaica.

2.5. Técnica Doctor Blade na preparação de fotoânodos

Além da composição química, o método de deposição exerce influência direta sobre as propriedades dos fotoânodos. Características como espessura, uniformidade, aderência, porosidade e conectividade entre partículas dependem tanto da formulação da pasta quanto das condições utilizadas durante sua deposição e posterior tratamento térmico.

A técnica *Doctor Blade* consiste, de forma geral, na deposição de uma pasta ou suspensão sobre um substrato seguida de seu espalhamento por uma lâmina, enquanto espaçadores ou a distância entre a lâmina e o substrato auxiliam no controle da espessura do filme. Após a deposição, o filme é submetido à secagem e, quando necessário, a tratamento térmico para remover componentes orgânicos e favorecer a aderência e a conectividade entre as partículas (AHMADI et al., 2014).

Entre as principais vantagens do *Doctor Blade* estão a simplicidade operacional, o baixo custo, o reduzido desperdício de material e a possibilidade de obtenção de filmes com espessura controlável. A técnica também é compatível com a fabricação de camadas particuladas relativamente espessas e porosas, característica particularmente importante para fotoânodos de DSSCs. Estudos comparativos demonstram que as condições de deposição influenciam diretamente a microestrutura do filme e, consequentemente, seu comportamento fotovoltaico (AGRAWAL et al., 2021).

Além disso, trabalhos recentes continuam apontando o *Doctor Blade* como uma técnica relevante para a fabricação de fotoânodos devido à possibilidade de controle da camada e ao potencial de adaptação para processos de maior escala. Quando associado à otimização das propriedades reológicas da pasta, da espessura e do tratamento térmico, o método permite produzir filmes adequados à

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

adsorção do sensibilizador e ao transporte eletrônico (KHAIRUDIN et al., 2026).

Dessa forma, a utilização da técnica *Doctor Blade* para produzir os fotoânodos de SnO_2 e SnO_2 + 5% BCSO possibilita uma comparação direta entre as duas composições utilizando uma mesma rota de processamento. Essa abordagem é importante para que as diferenças estruturais, ópticas e fotovoltaicas observadas possam ser relacionadas principalmente à incorporação do $BaCuSi_4O_{10}$, desde que as demais condições experimentais sejam mantidas constantes.

3. Metodologia

3.1. Delineamento Experimental

O procedimento experimental foi organizado em etapas sequenciais envolvendo: (i) obtenção do $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO); (ii) preparação das composições de SnO_2 puro e SnO_2 contendo 5% em massa de BCSO; (iii) preparação das pastas; (iv) deposição dos fotoânodos sobre substratos de óxido de estanho dopado com flúor (FTO) pela técnica *Doctor Blade*; (v) tratamento térmico dos filmes; (vi) sensibilização com o corante N719; (vii) montagem das células solares sensibilizadas por corante (DSSCs); e (viii) caracterizações estrutural, vibracional, morfológica, composicional, óptica e fotovoltaica.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

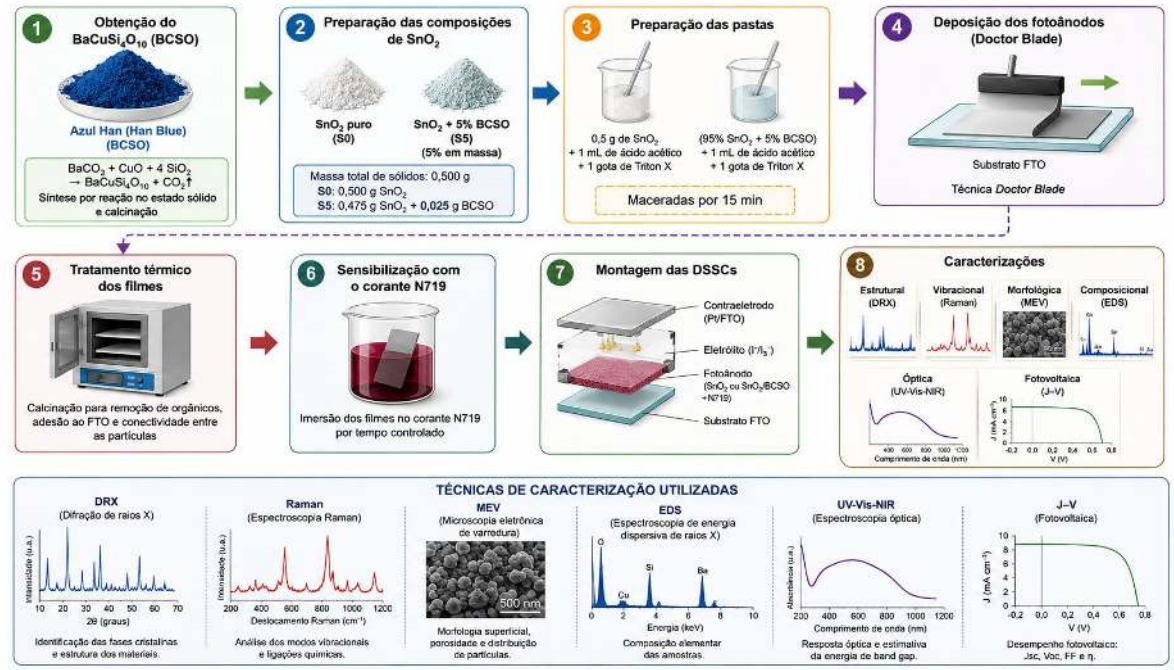


Figura 1. Representação esquemática do procedimento experimental empregado na preparação dos fotoânodos de SnO_2 puro e SnO_2 + 5% BCSO pela técnica *Doctor Blade* e posterior aplicação em células solares sensibilizadas por corante.

3.2. Preparação do $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO)

O material cerâmico $BaCuSi_4O_{10}$, conhecido como Azul Han (*Han Blue*), foi sintetizado pelo método convencional de reação no estado sólido, utilizando óxido de cobre (CuO, 99%, Vetec), dióxido de silício (SiO_2, 99,6%, Aldrich) e carbonato de bário ($BaCO_3$, 99%, Vetec) como precursores químicos. Os reagentes foram pesados de acordo com a proporção estequiométrica $BaCO_3$:CuO:SiO_2 de 1:1:4, correspondente à seguinte reação global:

$$BaCO_3 + CuO + 4SiO_2 \rightarrow BaCuSi_4O_{10} + CO_2\uparrow$$

Os precursores foram homogeneizados em moinho planetário Pulverisette 6 (Fritsch), utilizando esferas de zircônia com diâmetro de 2,0 mm e recipientes de poliacetato com altura de 31,75 mm e diâmetro de 85,1 mm. Foi empregada uma

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

relação bola:pó de 97,5 g:10 g, com velocidade de rotação de 360 rpm durante 3 h.

Após a moagem, o material foi submetido à calcinação em forno a 1050 °C durante 6 h, utilizando taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1}, sob atmosfera de ar. Ao término do tratamento térmico, o material foi resfriado naturalmente no interior do forno até a temperatura ambiente.

O pó cerâmico obtido foi então retirado, sem etapas posteriores de lavagem, armazenado em recipiente hermeticamente fechado e posteriormente utilizado na preparação das composições de SnO_2 contendo 5% em massa de BCSO.

A reação química global de síntese do $BaCuSi_4O_{10}$ encontra-se esquematicamente representada na Figura 2.

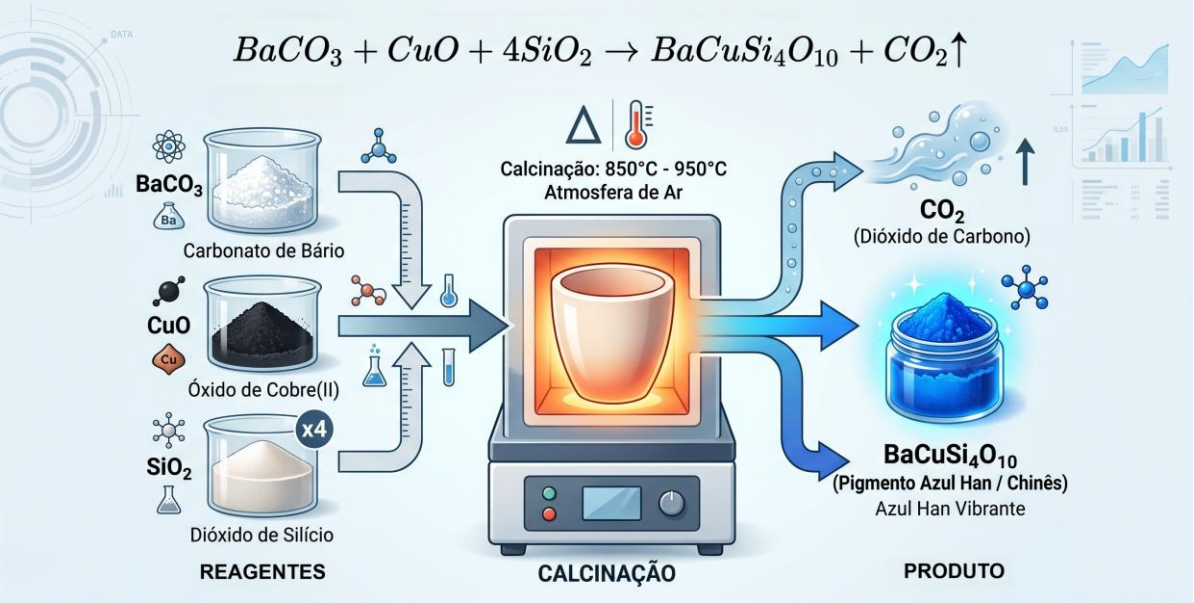


Figura 2. Representação esquemática da síntese do $BaCuSi_4O_{10}$, (conhecido como Azul Han (*Han Blue*), pelo método convencional de reação no estado sólido.

A reação no estado sólido constitui uma rota amplamente empregada na obtenção de silicatos de cobre alcalino-terrosos, uma vez que o tratamento térmico dos precursores em proporções estequiométricas adequadas favorece a formação das respectivas fases cristalinas e permite a obtenção desses materiais com elevada estabilidade térmica (BERKE, 2007; JOHNSON-MCDANIEL; SALGUERO, 2014; ZHANG et al., 2018).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

3.3. Preparação das Pastas de SnO_2 e SnO_2 + 5% BCSO

Foram preparadas duas composições para a fabricação dos filmes: SnO_2 puro, utilizado como material de referência, e SnO_2 modificado com 5% em massa de (BCSO). Para permitir uma comparação direta entre as composições, foi mantida uma massa total de 0,500 g de sólidos em cada formulação.

Para a preparação da pasta de referência (S0), foram utilizados 0,500 g de SnO_2, aos quais foram adicionados 1,0 mL de ácido acético e uma gota de Triton X.

Para a composição modificada (S5), correspondente a 95% SnO_2/5% BCSO em massa, foram utilizados 0,475 g de SnO_2 e 0,025 g de BCSO, mantendo-se a adição de 1,0 mL de ácido acético e uma gota de Triton X. As massas dos componentes foram determinadas a partir das respectivas frações mássicas:

$$m_{SnO_2} = 0{,}95 \times 0{,}500 = 0{,}475 \text{ g}$$

e

$$m_{BCSO} = 0{,}05 \times 0{,}500 = 0{,}025 \text{ g}$$

Após a adição dos componentes, cada pasta foi macerada manualmente durante 15 min, visando promover a homogeneização dos constituintes e obter consistência adequada para a deposição. O ácido acético foi empregado como componente líquido da formulação, enquanto o Triton X atuou como surfactante, contribuindo para a dispersão das partículas e para a molhabilidade da pasta.

As pastas obtidas foram depositadas sobre substratos condutores de óxido de estanho dopado com flúor (FTO) pela técnica *Doctor Blade*.

A técnica *Doctor Blade* é amplamente empregada na preparação de fotoânodos particulados para DSSCs devido à simplicidade operacional, baixo custo, reduzido desperdício de material e possibilidade de produção de filmes

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

porosos com espessura controlável (ITO et al., 2007; AHMADI et al., 2014).

O mesmo procedimento de deposição foi empregado para as amostras S0 e S5, mantendo-se constantes as condições de processamento para permitir uma comparação direta entre os materiais.

A área de deposição foi delimitada utilizando fita Kapton como espaçador, com espessura nominal de 50 µm, definindo uma área de filme de aproximadamente 25 mm². A pasta foi espalhada sobre a região delimitada, buscando manter condições equivalentes de deposição para as amostras S0 e S5. Após a deposição, os filmes foram secos à temperatura ambiente e posteriormente submetidos a tratamento térmico em atmosfera de ar, partindo de 25 °C até 450 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1}, permanecendo a 450 °C durante 2 h. Ao término do tratamento, as amostras foram resfriadas naturalmente até a temperatura ambiente. O tratamento térmico foi empregado para promover a remoção dos componentes voláteis e orgânicos presentes nas pastas e favorecer a estabilidade e a aderência das camadas depositadas sobre os substratos FTO.

Para facilitar a identificação das amostras ao longo do trabalho, foram adotadas as seguintes denominações:

- **S0 –** *SnO_2 puro*
- **S5 –** *SnO_2 + 5% BCSO*

A concentração de 5% em massa de BCSO foi adotada como uma composição exploratória para avaliar, em caráter de prova de conceito (*proof-of-concept*), a viabilidade da utilização do $BaCuSi_4O_{10}$ como modificador funcional de sistemas baseados em SnO_2. A escolha desse teor teve como objetivo introduzir uma fração minoritária do material cerâmico, preservando o SnO_2 como componente predominante da matriz. Ressalta-se que o presente estudo não realizou uma investigação sistemática em função da concentração de BCSO; portanto, o teor de 5% não deve ser interpretado como uma composição ótima. A determinação de uma concentração ótima exigirá estudos posteriores envolvendo

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

diferentes proporções de BCSO e avaliação sistemática de suas propriedades morfológicas, ópticas e fotovoltaicas.

3.4. Sensibilização com N719 e Montagem das DSSCs

Após o tratamento térmico e o resfriamento dos filmes até a temperatura ambiente, os fotoânodos de SnO_2 puro (S0) e SnO_2 + 5% BCSO (S5) foram submetidos à etapa de sensibilização. A sensibilização foi realizada por imersão dos fotoânodos durante 24 h em solução 0,5 mM do corante N719 (Ruthenizer 535-bisTBA, Solaronix), preparada em etanol. A utilização desse complexo de rutênio como sensibilizador é amplamente estabelecida em células solares sensibilizadas por corante devido à sua absorção na região visível e à capacidade de promover, após fotoexcitação, a injeção de elétrons na banda de condução de semicondutores de ampla banda proibida, como o SnO_2 (NAZEERUDDIN et al., 1993; HAGFELDT et al., 2010).

Após o período de sensibilização, as DSSCs foram montadas em configuração tipo sanduíche, utilizando os fotoânodos sensibilizados e contraeletrodos constituídos por FTO platinizado (Solaronix). A separação e a selagem entre os eletrodos foram realizadas utilizando Meltonix, delimitando a região interna da célula e evitando o contato elétrico direto entre o fotoânodo e o contraeletrodo.

O eletrólito comercial Iodolyte AN-50 (Solaronix), contendo o par redox I^-/I_3^-, foi introduzido entre o fotoânodo e o contraeletrodo. Nesse sistema, o eletrólito participa da regeneração do sensibilizador após a injeção eletrônica e do transporte de carga entre os eletrodos, permitindo a continuidade do ciclo fotoeletroquímico da DSSC (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991; HAGFELDT et al., 2010).

A área ativa considerada para cada dispositivo foi de 0,25 cm². As mesmas condições de sensibilização, montagem, eletrólito e área ativa foram mantidas para as células contendo S0 e S5, de modo a permitir a comparação direta do desempenho fotovoltaico entre as duas composições.

A arquitetura utilizada para a montagem das DSSCs encontra-se

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

esquematicamente representada na Figura 3.

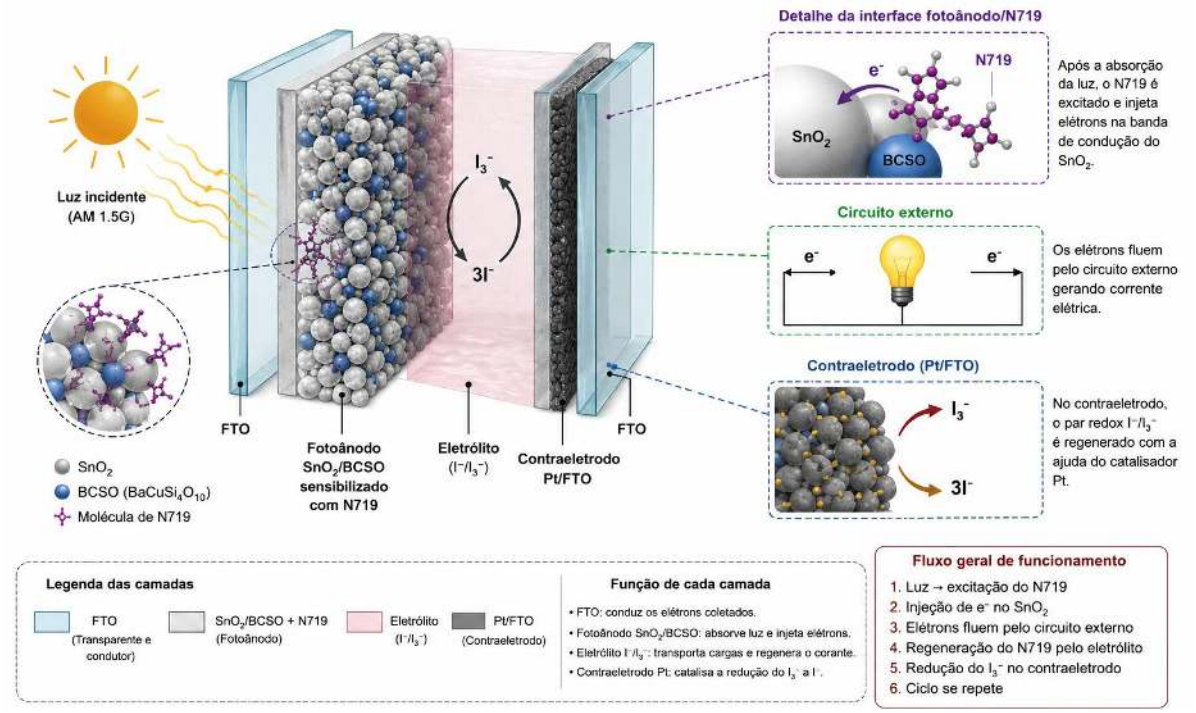


Figura 3. Representação esquemática da arquitetura da célula solar sensibilizada por corante constituída por fotoânodo de SnO_2 ou SnO_2/BCSO sensibilizado com N719, eletrólito I^-/I_3^- e contraeletrodo de FTO/Pt.

3.5. Caracterização Estrutural por Difração de Raios X

A caracterização estrutural das amostras foi realizada por difração de raios X (DRX) em um difratômetro PANalytical X'Pert PRO, modelo MPD, utilizando radiação Cu Kα (λ = 1,5406 Å), operando a 40 kV e 40 mA.

As medidas foram realizadas em geometria de feixe paralelo, utilizando monocromador, fenda de 1/4° e fenda Soller de 0,02°. O porta-amostras foi acoplado a um sistema *spinner*, e os difratogramas foram obtidos no intervalo de 10° a 70° (2θ), com passo de 0,013°.

Os difratogramas foram empregados para avaliar as características cristalinas das amostras e identificar as fases presentes nos materiais investigados.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

3.6. Espectroscopia Raman

As análises por espectroscopia Raman foram realizadas em um espectrômetro LabRAM Jobin-Yvon HORIBA, equipado com detector CCD (*charge-coupled device*) resfriado com nitrogênio líquido.

Foi utilizado um laser com comprimento de onda de 633 nm, focalizado sobre a superfície das amostras por meio de uma objetiva OLYMPUS de 100×, com abertura numérica de 0,75, produzindo uma área de focalização de aproximadamente 4 μm^2.

Os espectros Raman foram utilizados para investigar os modos vibracionais característicos do SnO_2 e do $BaCuSi_4O_{10}$.

3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

A morfologia superficial e a composição química das amostras foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio Inspect S50, localizado na Central Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC), associado à espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

As micrografias obtidas em diferentes ampliações foram utilizadas para avaliar características como morfologia superficial, distribuição das partículas, formação de aglomerados e porosidade dos fotoânodos.

A análise por EDS foi empregada como técnica complementar para identificar os elementos químicos presentes nos materiais, particularmente Sn e O para o SnO_2 e Ba, Cu, Si e O para o BCSO.

3.8. Caracterização Óptica por UV–Vis–NIR

As propriedades ópticas foram investigadas por espectroscopia UV–Vis–NIR utilizando um espectrofotômetro Shimadzu UV-2600, equipado com esfera integradora ISR-2600Plus.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Os espectros foram registrados no intervalo de 200 a 1200 nm, com resolução espectral de 1 nm. Os dados de reflectância difusa foram utilizados para investigar a resposta óptica das amostras e estimar a energia da banda proibida (*band gap*, Eg).

Para o tratamento dos dados de reflectância difusa foi utilizada a função de Kubelka–Munk:

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

em que R corresponde à reflectância difusa.

A energia de band gap foi estimada utilizando a transformação de Kubelka–Munk combinada ao método de Tauc, segundo a relação:

$$[F(R)hv]^n = A(hv - E_g)$$

em que hv representa a energia do fóton incidente, A é uma constante, E_g corresponde à energia da banda proibida e n depende da natureza da transição eletrônica considerada (TAUC; GRIGOROVICI; VANCU, 1966).

O valor de Eg foi obtido pela extrapolação da região linear apropriada da curva de Tauc até sua interseção com o eixo correspondente à energia dos fótons.

3.9. Caracterização Fotovoltaica

A caracterização fotovoltaica das DSSCs foi realizada utilizando um potenciostato AUTOLAB PGSTAT302N (Metrohm), controlado pelo software NOVA, versão 2.11.

As medidas foram conduzidas sob iluminação solar simulada utilizando um

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

simulador solar Ossila, série G200, ajustado para condições AM 1.5G. A irradiância de referência foi calibrada em 100 mW cm^{-2} (1 sun) utilizando uma célula solar de referência de silício Newport/Oriel 91150V-KG5, equipada com filtro KG5.

Adicionalmente, as células foram avaliadas sob irradiâncias de 0,033 e 0,067 W cm^{-2}, permitindo investigar o comportamento dos dispositivos em diferentes intensidades de iluminação.

Foram obtidas as curvas de densidade de corrente em função da tensão (J–V), a partir das quais foram determinados a tensão de circuito aberto (Voc), a densidade de corrente de curto-circuito (Jsc), o fator de preenchimento (FF) e a eficiência de conversão de potência (η) (HAGFELDT et al., 2010).

O fator de preenchimento foi determinado por:

$$FF = \frac{J_{max}V_{max}}{J_{sc}V_{oc}}$$

em que J_{max} e V_{max} correspondem, respectivamente, à densidade de corrente e à tensão no ponto de máxima potência.

A eficiência de conversão de potência foi calculada por:

$$\eta(\%) = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \times 100$$

em que P_{in} corresponde à potência luminosa incidente.

Para cada condição experimental, foram fabricadas cinco DSSCs, correspondentes às composições S0 (SnO_2 puro) e S5 (SnO_2 + 5% em massa de BCSO). Entretanto, os dados individuais completos dos cinco dispositivos de cada composição não foram preservados em formato que possibilitasse uma análise estatística retrospectiva rigorosa. Dessa forma, os parâmetros fotovoltaicos e as curvas J–V apresentados neste trabalho correspondem aos dispositivos de melhor

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

desempenho (*champion devices*) obtidos para cada composição. Esses resultados são utilizados exclusivamente para uma comparação exploratória entre S0 e S5 e não devem ser interpretados como valores médios, demonstração de reprodutibilidade ou evidência de diferença estatisticamente significativa entre os grupos. Nesse contexto, a avaliação fotovoltaica apresentada deve ser considerada uma prova de conceito (*proof-of-concept*) do emprego de BCSO como modificador funcional de sistemas baseados em SnO_2.

4. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos foram analisados de forma comparativa entre o fotoânodo de SnO_2 puro e o sistema modificado com 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO). A discussão foi direcionada à compreensão dos efeitos da incorporação do BCSO sobre as características vibracionais, morfológicas, composicionais e ópticas do material e, principalmente, sobre o desempenho fotovoltaico das DSSCs.

4.1. Caracterização Estrutural por Difração de Raios X (DRX)

A caracterização por difração de raios X foi utilizada para avaliar as características estruturais dos materiais empregados na preparação dos fotoânodos. A Figura 4 apresenta o difratograma experimental do SnO_2 puro em conjunto com o padrão de referência do $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), permitindo identificar as reflexões características das fases utilizadas na preparação do sistema compósito.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

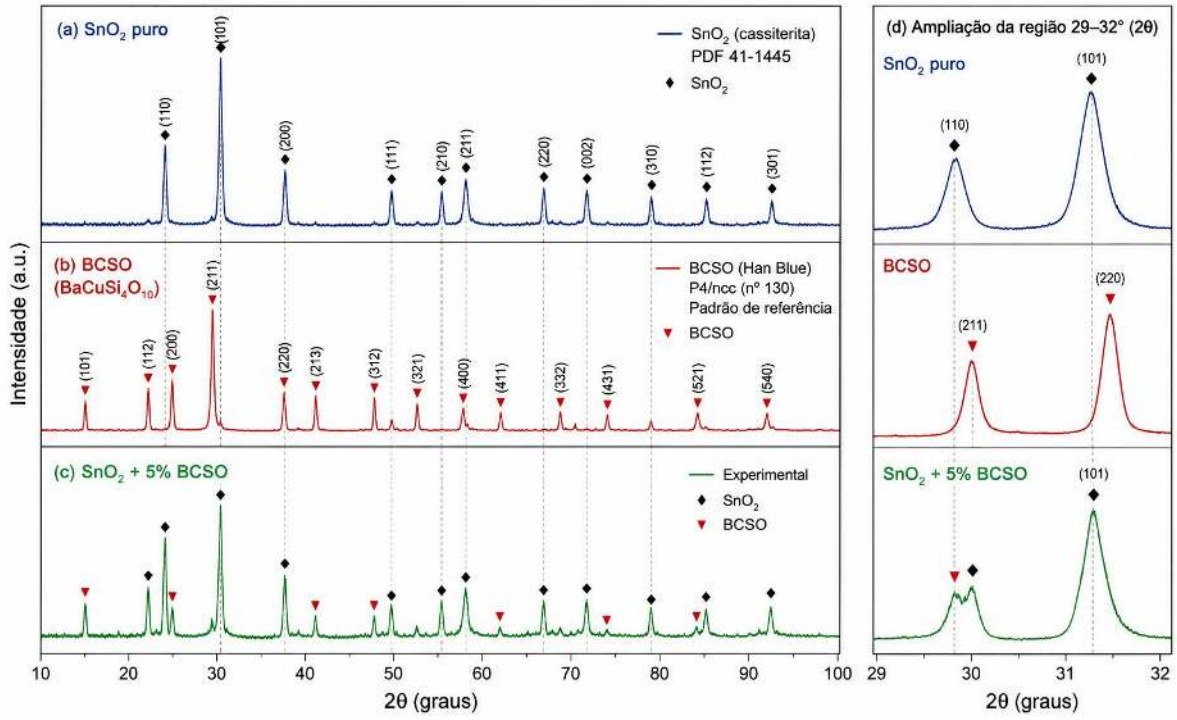


Figura 4. Difratograma de raios X experimental do SnO_2 puro e padrão de referência do $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO), utilizado para identificação das fases cristalinas empregadas na preparação dos fotoânodos.

O padrão do SnO_2 apresenta reflexões características da fase tetragonal cassiterita, estrutura cristalina típica desse óxido. A identificação dessa fase é importante para a aplicação fotovoltaica, uma vez que as propriedades de transporte eletrônico do SnO_2 estão diretamente relacionadas à sua estrutura e qualidade cristalina. O dióxido de estanho cristaliza no sistema tetragonal, grupo espacial *$P4_2/mnm$*, sendo amplamente empregado como semicondutor do tipo *n* em aplicações optoeletrônicas e em fotoânodos de DSSCs (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

Por sua vez, o padrão de referência do $BaCuSi_4O_{10}$ apresenta um conjunto distinto de reflexões, consistente com a estrutura tetragonal característica do BCSO (*Han Blue*), pertencente ao grupo espacial *P4/ncc*. A diferença entre os padrões cristalográficos do SnO_2 e do BCSO permite distinguir as duas fases quando presentes no sistema compósito.

A comparação dos padrões é particularmente importante considerando a

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

baixa concentração de BCSO utilizada neste trabalho (5% em massa). Em sistemas contendo pequenas quantidades de uma segunda fase cristalina, suas reflexões podem apresentar intensidade reduzida e eventualmente se sobrepor às reflexões da fase majoritária. Dessa forma, a ausência de picos intensos atribuíveis ao BCSO em um compósito contendo apenas 5% em massa não deve ser interpretada isoladamente como ausência do material.

A identificação estrutural deve, portanto, ser analisada conjuntamente com as demais técnicas empregadas neste trabalho. Nesse sentido, a espectroscopia Raman fornece informações complementares sobre as assinaturas vibracionais do BCSO, enquanto as análises por MEV/EDS permitem avaliar as alterações morfológicas e a composição elementar dos materiais. Essa abordagem combinada fornece uma caracterização mais consistente do sistema SnO_2/BCSO.

4.2. Caracterização por Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman foi empregada para investigar as características vibracionais dos materiais utilizados na preparação dos fotoânodos. A Figura 5 apresenta os espectros Raman correspondentes ao SnO_2 puro e ao (BCSO).

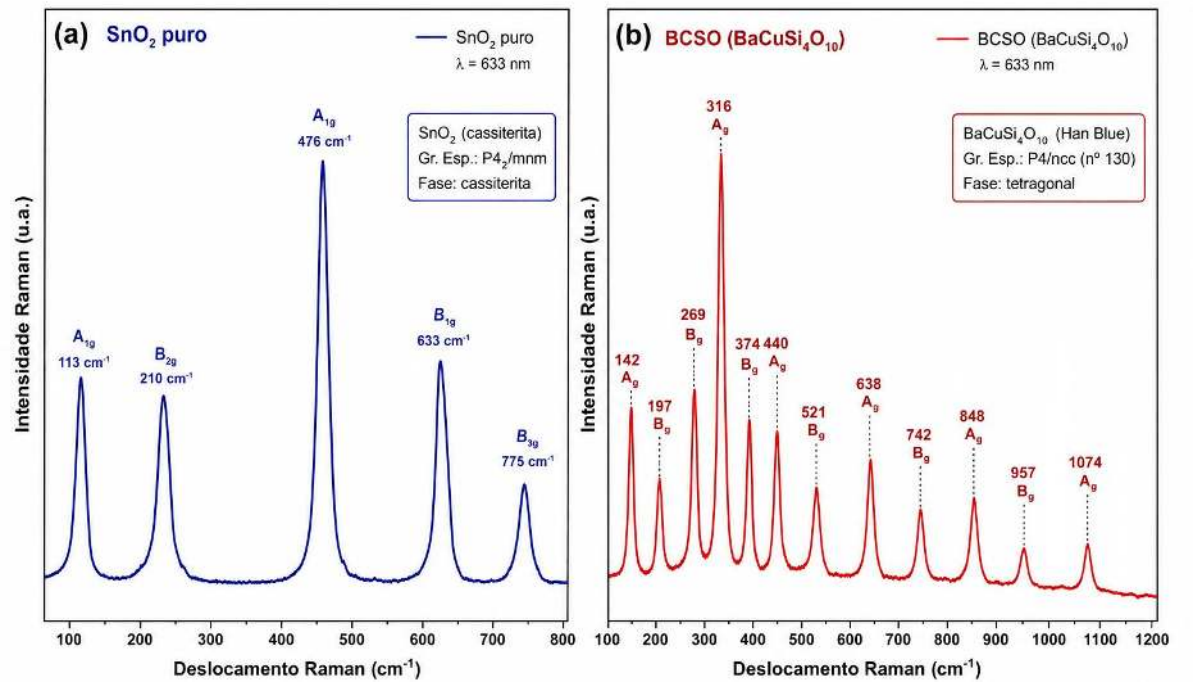


Figura 5. Espectros Raman do (a) SnO_2 puro e (b) BCSO, evidenciando os principais modos vibracionais característicos dos materiais.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

O SnO_2 apresenta estrutura tetragonal do tipo rutilo (cassiterita), pertencente ao grupo espacial *$P4_2/mnm$*. Para o SnO_2 cristalino, os principais modos Raman ativos de primeira ordem são atribuídos às simetrias Eg, A_1g e B_2g, normalmente observadas em regiões próximas de 475, 630–635 e 770–780 cm^{-1}, respectivamente. Entre esses modos, a banda A_1g, associada principalmente às vibrações simétricas das ligações Sn–O, constitui uma das assinaturas Raman mais características da fase cassiterita (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

No espectro experimental do SnO_2 puro utilizado neste trabalho, observa-se uma banda intensa próxima de 630 cm^{-1}, atribuída ao modo A_1g, além de contribuições nas regiões próximas de 475 e 775 cm^{-1}, relacionadas aos modos Eg e B_2g, respectivamente. A presença dessas bandas é consistente com a estrutura tetragonal da cassiterita e confirma a identidade vibracional do SnO_2 empregado como matriz semicondutora dos fotoânodos. Sinais adicionais ou alargamentos observados no espectro podem estar relacionados a desordem estrutural, tamanho reduzido das partículas e defeitos presentes no material.

O $BaCuSi_4O_{10}$ apresenta um espectro Raman consideravelmente mais complexo devido à sua estrutura cristalina constituída por unidades de silicato associadas aos ambientes de coordenação de Cu^{2+} e Ba^{2+}. No espectro experimental do BCSO foram observadas bandas em aproximadamente 120, 130, 222, 347, 380, 423, 558, 793, 973, 997 e 1102 cm^{-1}. Entre essas contribuições, destacam-se a banda intensa localizada em aproximadamente 423 cm^{-1} e a banda de elevada intensidade próxima de 1102 cm^{-1}, que constituem características marcantes do espectro Raman da amostra analisada.

As bandas localizadas na região de menor número de onda estão predominantemente associadas aos modos externos da rede cristalina e às vibrações envolvendo os cátions e as unidades estruturais do material. Por outro lado, as bandas observadas em maiores números de onda, particularmente na região de aproximadamente 970–1100 cm^{-1}, estão relacionadas principalmente aos modos de estiramento das ligações Si–O das unidades silicatadas. O conjunto dessas bandas constitui uma assinatura vibracional característica do $BaCuSi_4O_{10}$

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

e fornece evidência complementar para a identificação do BCSO.

A comparação entre os dois espectros evidencia diferenças marcantes entre as assinaturas vibracionais do SnO_2 e do BCSO. Enquanto o SnO_2 apresenta um número relativamente reduzido de bandas características da estrutura cassiterita, o BCSO exibe maior número de modos vibracionais em decorrência de sua estrutura silicatada mais complexa.

A caracterização individual dos materiais é particularmente importante neste estudo, uma vez que o BCSO corresponde a apenas 5% em massa da composição modificada. Nessa concentração, eventuais bandas associadas ao $BaCuSi_4O_{10}$ no espectro do fotoânodo SnO_2 + 5% BCSO podem apresentar baixa intensidade, sofrer sobreposição com bandas da matriz ou permanecer abaixo do limite de detecção da técnica. Dessa forma, a baixa intensidade ou mesmo a ausência de determinadas bandas do BCSO no espectro do compósito não deve ser interpretada isoladamente como evidência da ausência dessa fase. A identificação do material deve ser realizada considerando conjuntamente os resultados de Raman, DRX e análise composicional por EDS.

4.3. Morfologia dos Fotoânodos

A morfologia dos fotoânodos exerce influência direta sobre o funcionamento das DSSCs, uma vez que a rugosidade, a porosidade, a distribuição das partículas e a conectividade da camada semicondutora afetam a área disponível para adsorção do sensibilizador, a penetração do eletrólito e o transporte das cargas fotogeradas (HAGFELDT et al., 2010; WALI; JOSE, 2019).

A Figura 6 apresenta micrografias representativas obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os fotoânodos de SnO_2 puro (S0) e para a composição nominal SnO_2 + 5% BCSO (S5). A análise morfológica foi realizada com o objetivo de comparar qualitativamente as características superficiais dos filmes produzidos pela técnica *Doctor Blade*, permitindo observar aspectos relacionados à distribuição das partículas, formação de aglomerados, rugosidade e porosidade aparente das camadas depositadas. Essa comparação é

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

particularmente relevante para verificar se a introdução nominal de BCSO promove alterações perceptíveis na organização morfológica do sistema em relação ao filme constituído exclusivamente por SnO_2. Ressalta-se, entretanto, que as micrografias fornecem informações predominantemente qualitativas e, portanto, não permitem determinar diretamente parâmetros como área superficial específica, espessura final dos filmes ou quantidade de corante N719 adsorvida. Essas limitações são consideradas na interpretação dos resultados apresentados a seguir.

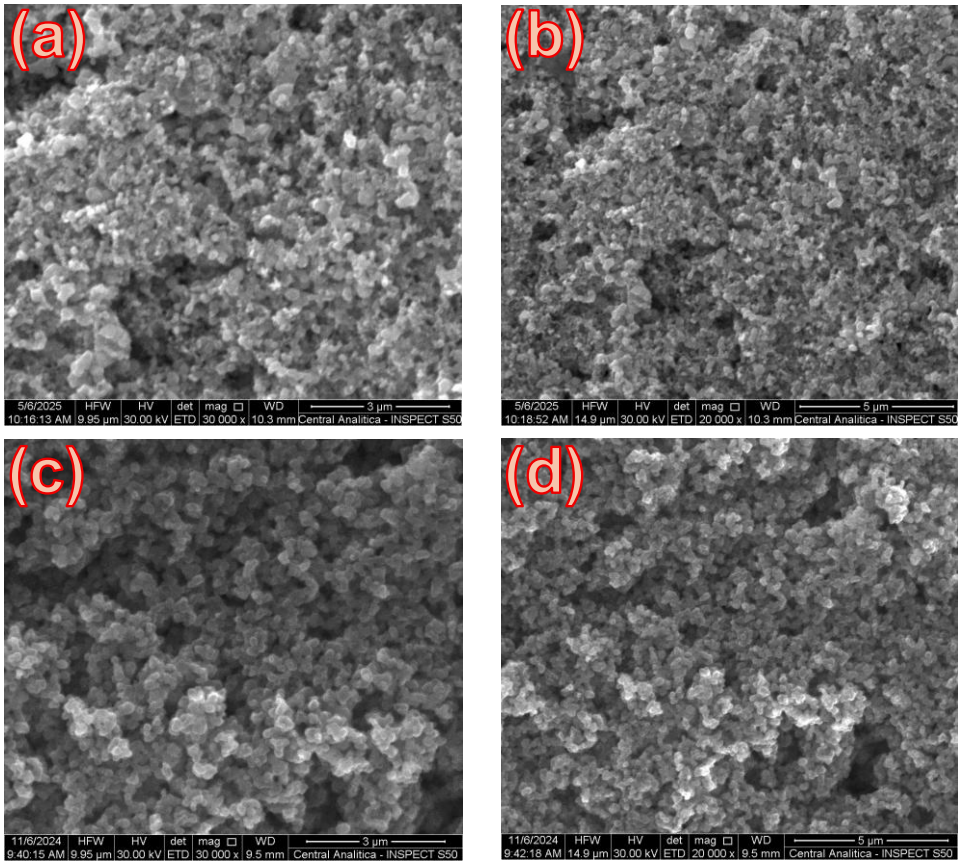


Figura 6. Micrografias de MEV dos fotoânodos preparados pela técnica *Doctor Blade*: (a–b) SnO_2 puro e (c–d) SnO_2 + 5% BCSO, obtidas em diferentes ampliações.

As micrografias do SnO_2 puro revelam uma superfície constituída por partículas finas fortemente aglomeradas, formando uma estrutura irregular e porosa. A presença de espaços interpartículas produz uma microestrutura com elevada rugosidade aparente, característica desejável para fotoânodos de DSSCs,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

pois pode proporcionar uma área interfacial elevada para a adsorção das moléculas do sensibilizador.

Após a incorporação de 5% de BCSO, a estrutura particulada e porosa é preservada, porém observa-se uma maior heterogeneidade morfológica, incluindo regiões formadas por aglomerados de dimensões distintas distribuídos na matriz. Essa alteração indica que a introdução do $BaCuSi_4O_{10}$ modifica a organização das partículas sem promover a formação de uma camada compacta ou eliminar a porosidade característica do fotoânodo.

A manutenção dessa estrutura porosa é relevante para a aplicação fotovoltaica. Em uma DSSC, o aumento da área superficial disponível pode favorecer a adsorção do corante N719 e ampliar a interface fotoânodo/corante/eletrólito. Entretanto, a interpretação deve considerar que a análise por MEV, isoladamente, não permite atribuir partículas específicas ao BCSO. A confirmação da composição química deve ser realizada conjuntamente com os resultados de EDS.

A presença de aglomerados também deve ser considerada sob a perspectiva do transporte eletrônico. Embora uma superfície altamente desenvolvida possa favorecer a adsorção do sensibilizador, aglomerações excessivas e interfaces adicionais podem introduzir barreiras ao transporte ou centros de recombinação. Portanto, a avaliação do efeito final da modificação deve ser realizada em conjunto com os resultados fotovoltaicos.

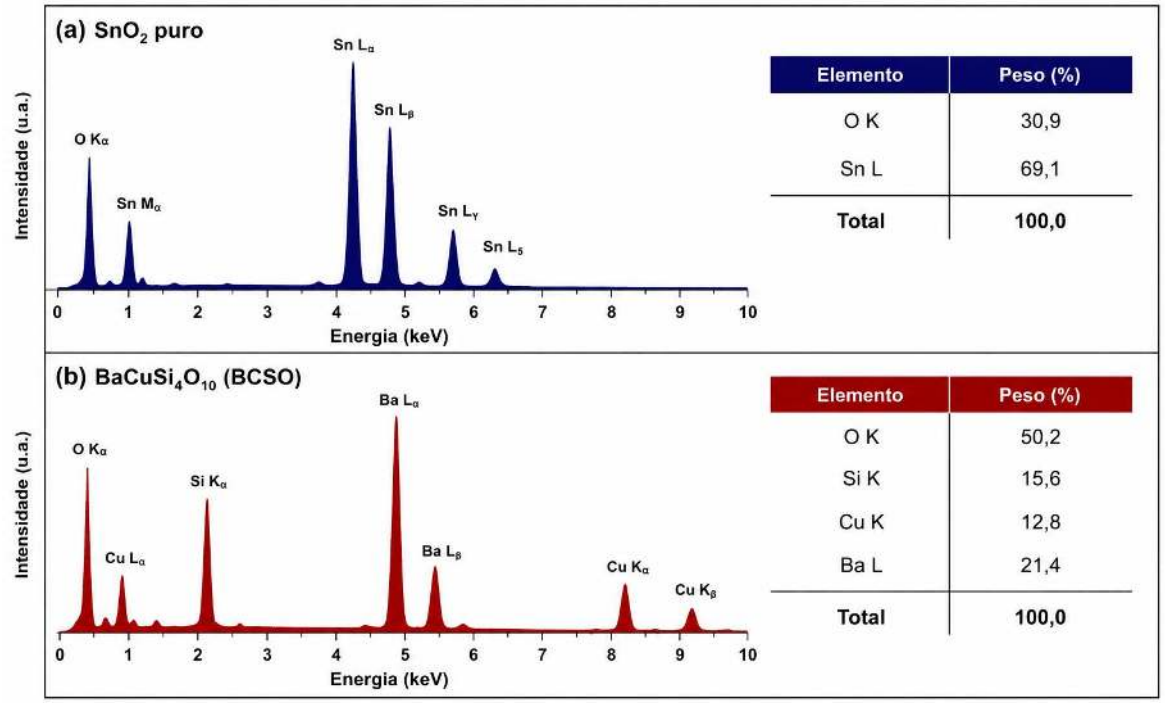
4.4. Análise Composicional por EDS

A análise por espectroscopia de energia dispersiva de raios X foi utilizada como técnica complementar para verificar a composição elementar dos materiais. A Figura 7 apresenta os espectros EDS correspondentes ao SnO_2 puro e ao $BaCuSi_4O_{10}$.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44



Elemento	Peso (%)
O K	30,9
Sn L	69,1
Total	**100,0**

Elemento	Peso (%)
O K	50,2
Si K	15,6
Cu K	12,8
Ba L	21,4
Total	**100,0**

Figura 7. Caracterização composicional por EDS: (a) espectro do SnO_2 puro; (b) espectro EDS do BCSO, mostrando a distribuição dos elementos Ba, Cu, Si e O.

Para a amostra de SnO_2, os sinais associados ao Sn e O são compatíveis com a composição esperada para o dióxido de estanho. Eventuais sinais provenientes de outros elementos presentes no espectro devem ser interpretados com cautela, uma vez que podem estar associados ao substrato, ao suporte empregado na análise ou à preparação da amostra, não sendo considerados evidência de constituintes da fase SnO_2.

Para o BCSO, a análise por EDS revelou a presença dos quatro elementos esperados para a composição BCSO: Ba, Cu, Si e O, corroborando a composição elementar do material. A análise semiquantitativa forneceu teores de aproximadamente 34,1% em massa de Ba, 16,0% de Cu, 27,6% de Si e 22,4% de O. A maior contribuição em massa observada para o Ba é compatível com sua elevada massa atômica em relação aos demais elementos constituintes. Pequenas diferenças em relação à composição estequiométrica teórica podem estar associadas às características inerentes à análise por EDS, incluindo rugosidade superficial, heterogeneidade local da amostra, volume de interação do feixe

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

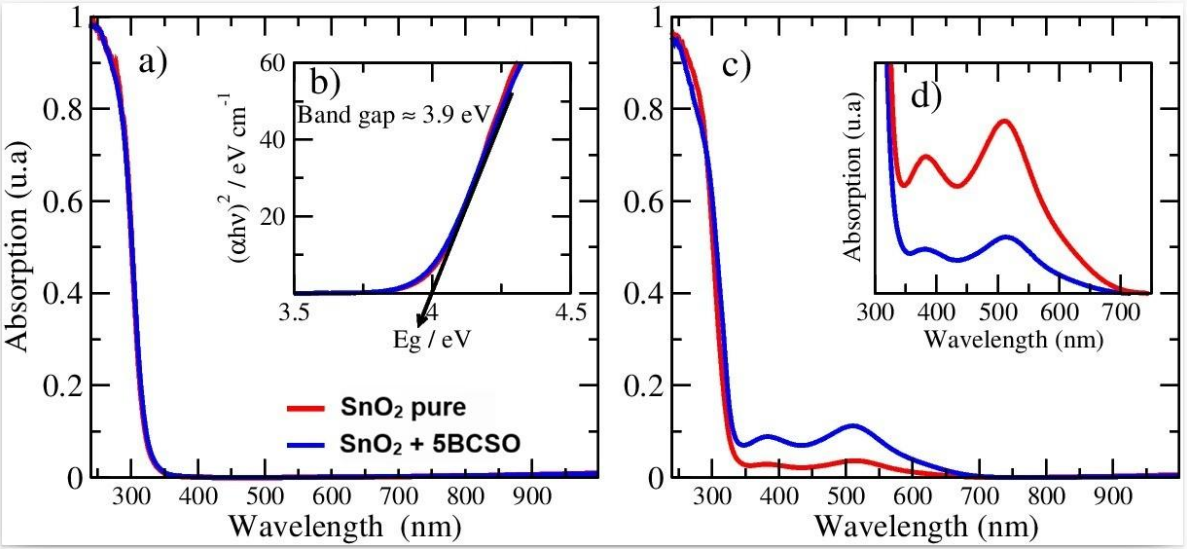
Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

eletrônico e sensibilidade de detecção para cada elemento. Em conjunto, a identificação de Ba, Cu, Si e O, associada aos resultados estruturais e vibracionais, fornece evidências complementares para a caracterização do BCSO empregado neste estudo.

Os resultados de EDS, associados à assinatura vibracional observada por Raman, fornecem evidências complementares da composição do material empregado como BCSO. Entretanto, esses resultados não devem ser utilizados isoladamente para afirmar a distribuição espacial do BCSO dentro do fotoânodo SnO_2/BCSO. A incorporação do material no compósito é discutida considerando conjuntamente a composição nominal utilizada durante a preparação, as alterações morfológicas e as propriedades ópticas e fotovoltaicas observadas.

4.5. Propriedades Ópticas e Energia de Band Gap

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos por espectroscopia UV–Vis–NIR e o tratamento dos dados ópticos para determinação da energia de *band gap*. A incorporação do BCSO promove alterações perceptíveis na resposta óptica em comparação com o SnO_2 puro.



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

Figura 8. Propriedades ópticas das amostras de SnO_2 puro e SnO_2 + 5% BCSO: (a) espectros obtidos por UV–Vis–NIR e (b) representação de Tauc utilizada para estimativa da energia de *band gap*.

O SnO_2 é um semicondutor de ampla banda proibida e apresenta elevada transparência na região visível, característica relevante para sua utilização como fotoânodo. Valores de Eg próximos de 3,6 eV são frequentemente reportados para o material, embora o valor experimental possa variar em função do tamanho das partículas, cristalinidade, defeitos, método de preparação e procedimento empregado para análise óptica (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015).

A introdução do $BaCuSi_4O_{10}$ produz uma modificação da resposta espectral, especialmente na região visível. Esse comportamento é coerente com a natureza opticamente ativa do BCSO, cuja coloração azul está relacionada às transições eletrônicas envolvendo os centros Cu^{2+} presentes em sua estrutura. Dessa forma, mesmo em uma concentração relativamente baixa de 5% em massa, sua incorporação pode alterar a interação da camada fotoativa com a radiação incidente.

A energia óptica característica foi estimada a partir dos dados espectrais utilizando a transformação de Kubelka–Munk combinada ao método de Tauc (TAUC; GRIGOROVICI; VANCU, 1966). Considerando o comportamento óptico atribuído ao SnO_2, foi adotada uma transição direta permitida, utilizando-se a relação *[F(R)hv]2* em função da energia do fóton *hv*. A energia óptica foi estimada pela extrapolação da região aproximadamente linear da borda de absorção até a interseção com o eixo de energia. Para a composição S5, que contém nominalmente duas fases opticamente distintas, o valor obtido é tratado como uma energia óptica aparente ou efetiva do sistema, não sendo interpretado como evidência de modificação intrínseca da estrutura eletrônica ou da banda proibida do SnO_2.

Essa distinção é importante, pois a melhora do desempenho fotovoltaico não precisa decorrer exclusivamente de uma redução do *band gap*. Alterações na absorção e no espalhamento da luz, na morfologia, na quantidade de sensibilizador adsorvido e nas interfaces entre as partículas também podem contribuir para a

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

geração e coleta de fotocorrente.

4.6. Desempenho Fotovoltaico das DSSCs

A influência da incorporação nominal de 5% em massa de BCSO sobre o desempenho fotovoltaico foi avaliada por meio das curvas de densidade de corrente em função da tensão (J–V). A Figura 9 apresenta as curvas correspondentes aos dispositivos de melhor desempenho (*champion devices*) obtidos para S0 e S5. Portanto, a comparação realizada nesta seção possui caráter exploratório e não representa uma comparação entre valores médios ou uma demonstração de diferença estatisticamente significativa entre as duas composições.

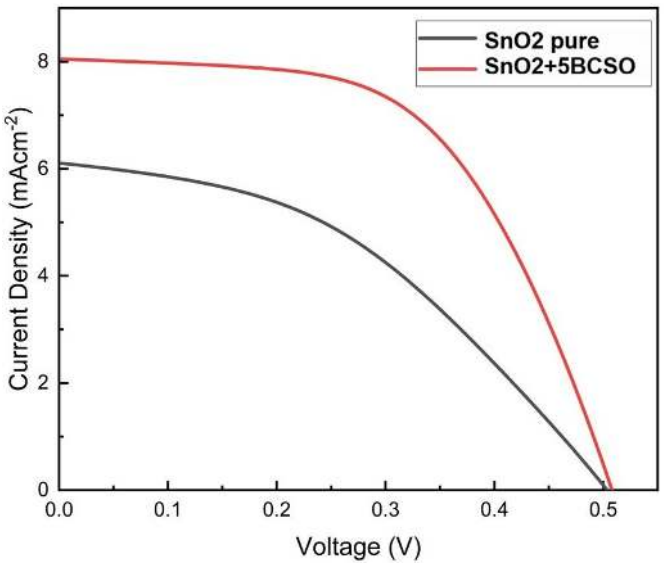


Figura 9. Curvas de densidade de corrente–tensão (J–V) das DSSCs contendo fotoânodos de SnO_2 puro e SnO_2 + 5% BCSO, obtidas sob iluminação solar simulada AM 1.5G (100 mW cm^{-2}).

As curvas J–V evidenciam uma melhora no desempenho fotovoltaico após a incorporação do BCSO ao fotoânodo de SnO_2. O dispositivo contendo SnO_2 puro apresentou densidade de corrente de curto-circuito (Jsc) de aproximadamente 6,10 mA cm^{-2}, enquanto a DSSC contendo SnO_2 + 5% BCSO alcançou aproximadamente 8,05 mA cm^{-2}. O aumento relativo de Jsc pode ser determinado pela Equação abaixo:

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

$$\Delta J_{sc}(\%) = \frac{J_{sc,BCSO} - J_{sc,SnO_2}}{J_{sc,SnO_2}} \times 100$$

Substituindo-se os valores experimentais:

$$\Delta J_{sc}(\%) = \frac{8{,}05 - 6{,}10}{6{,}10} \times 100 \approx 31{,}97\%$$

Portanto, a incorporação de 5% em massa de BCSO promoveu um aumento de aproximadamente 32% na densidade de corrente de curto-circuito em relação ao dispositivo contendo SnO_2 puro.

A tensão de circuito aberto (Voc), por outro lado, apresentou apenas uma pequena variação, passando de aproximadamente 0,504 V para o SnO_2 puro para 0,508 V para o sistema SnO_2 + 5% BCSO. A variação corresponde a menos de 1%, indicando que a incorporação do BCSO exerceu influência relativamente pequena sobre Voc. Dessa forma, a melhoria observada no desempenho do dispositivo está relacionada principalmente ao aumento da fotocorrente e à alteração do formato da curva J–V, e não a um aumento significativo da tensão de circuito aberto.

Os valores relativamente moderados de Voc são compatíveis com características conhecidas de DSSCs baseadas em SnO_2. Embora esse semicondutor apresente propriedades interessantes para transporte eletrônico, a posição de sua banda de condução pode resultar em valores de Voc inferiores aos frequentemente encontrados em DSSCs baseadas em TiO_2, constituindo uma das limitações conhecidas desse material quando utilizado como fotoânodo (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015; WALI; JOSE, 2019).

Além do aumento de Jsc, foi observada uma melhoria importante no fator de preenchimento (FF). O dispositivo contendo SnO_2 puro apresentou FF ≈ 0,42, enquanto a célula modificada com BCSO apresentou FF ≈ 0,56. Isso corresponde a um aumento relativo de aproximadamente 33% nesse parâmetro. Como o FF está relacionado à capacidade do dispositivo de fornecer potência útil em relação aos valores ideais definidos por Jsc e Voc, seu aumento contribuiu diretamente para a

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

melhoria da eficiência de conversão de potência (HAGFELDT et al., 2010).

Os parâmetros fotovoltaicos obtidos para os melhores dispositivos de cada composição são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros fotovoltaicos dos dispositivos de melhor desempenho (*champion devices*) obtidos para S0 e S5 sob iluminação solar simulada AM 1.5G (100 mW cm^{-2}).

Fotoânodo	BCSO (wt.%)	Jsc (mA cm^{-2})	Voc (V)	FF	η (%)
SnO_2	0	6,10	0,504	0,42	1,30
SnO_2 + BCSO	5	8,05	0,508	0,56	2,31

Fonte: O próprio autor.

Nota: *Os valores apresentados correspondem aos dispositivos de melhor desempenho obtidos para cada composição. Portanto, representam uma comparação exploratória entre os champion devices e não valores médios, demonstração de reprodutibilidade ou evidência de diferença estatisticamente significativa entre S0 e S5.*

A combinação do aumento de Jsc e FF resultou em uma melhoria expressiva na eficiência de conversão de potência (η). A DSSC baseada em SnO_2 puro apresentou eficiência de aproximadamente 1,30%, enquanto o dispositivo contendo SnO_2 + 5% BCSO atingiu aproximadamente 2,31%. O ganho relativo de eficiência pode ser estimado por:

$$\Delta\eta(\%) = \frac{\eta_{BCSO} - \eta_{SnO_2}}{\eta_{SnO_2}} \times 100$$

resultando em:

$$\Delta\eta(\%) = \frac{2{,}31 - 1{,}30}{1{,}30} \times 100 \approx 77{,}7\%$$

Na comparação entre os dispositivos de melhor desempenho, o dispositivo S5

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

apresentou eficiência de conversão de potência 78% superior à observada para o dispositivo S0. Esse resultado é particularmente relevante porque a variação de Voc foi pequena, indicando que o ganho de eficiência decorre predominantemente das melhorias observadas em Jsc e FF.

O aumento de Jsc pode estar associado a uma combinação de fatores relacionados às modificações promovidas pelo BCSO no fotoânodo. As análises morfológicas mostraram a manutenção de uma estrutura porosa após a incorporação do silicato, característica importante para a adsorção do corante N719 e para o contato entre o fotoânodo e o eletrólito. Paralelamente, os resultados ópticos indicaram alterações na resposta espectral do sistema após a introdução do BCSO. Considerando as propriedades ópticas características do $BaCuSi_4O_{10}$, efeitos relacionados à absorção e ao espalhamento da radiação incidente podem contribuir para aumentar o aproveitamento da luz no interior do fotoânodo e, consequentemente, favorecer a geração de fotocorrente (ZHANG et al., 2018).

A melhora simultânea de Jsc e FF também sugere que a incorporação do BCSO não atua exclusivamente sobre a resposta óptica do sistema. Alterações na morfologia, nas interfaces entre as partículas e no transporte e coleta dos elétrons fotogerados podem contribuir para o comportamento observado. Entretanto, os resultados disponíveis não permitem atribuir o aumento de desempenho a um mecanismo eletrônico específico. Apesar da elevada mobilidade eletrônica associada ao SnO_2, processos de recombinação e características energéticas de sua banda de condução constituem fatores importantes para o desempenho de DSSCs, razão pela qual modificações estruturais e interfaciais do fotoânodo têm sido investigadas como estratégias para melhorar seu comportamento fotovoltaico (WALI; FAKHARUDDIN; JOSE, 2015; WALI; JOSE, 2019).

Nesse sentido, técnicas complementares, como espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), poderiam fornecer informações sobre resistência de transferência de carga, transporte eletrônico e processos de recombinação. Da mesma forma, medidas de eficiência quântica externa ou IPCE (*Incident Photon-to-Current Conversion Efficiency*) permitiriam avaliar diretamente a contribuição espectral para a geração de fotocorrente e verificar em quais comprimentos de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

onda a incorporação do BCSO exerce maior influência (HAGFELDT et al., 2010).

Deve-se ressaltar que foram fabricadas cinco DSSCs independentes para cada composição, enquanto os valores apresentados na Figura 9 e na Tabela 1 correspondem aos dispositivos de melhor desempenho de cada conjunto. Consequentemente, o aumento de aproximadamente 78% na eficiência representa uma comparação entre os melhores dispositivos obtidos experimentalmente e não deve ser interpretado como diferença estatisticamente significativa entre as populações de células. A determinação dessa significância exigiria a apresentação dos parâmetros médios, desvios-padrão e análise estatística das cinco células de cada grupo.

Em conjunto, os resultados demonstram que a incorporação de 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ ao fotoânodo de SnO_2 foi acompanhada por aumento de Jsc de 6,10 para 8,05 mA cm^{-2}, de FF de 0,42 para 0,56 e de η de 1,30 para 2,31%, enquanto Voc permaneceu praticamente inalterado. Esses resultados indicam que o BCSO atua como um modificador funcional promissor para fotoânodos de SnO_2 preparados pela técnica *Doctor Blade*, favorecendo principalmente a geração/coleta de fotocorrente e o desempenho global das DSSCs.

Deve-se ressaltar que os parâmetros apresentados correspondem aos dispositivos de melhor desempenho de cada composição e, portanto, as diferenças observadas não podem ser interpretadas como demonstração de melhoria estatisticamente reprodutível do conjunto de células. Embora cinco DSSCs tenham sido fabricadas para cada condição experimental, a ausência dos dados individuais completos impossibilita a determinação retrospectiva de médias, desvios-padrão e distribuição dos parâmetros fotovoltaicos. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma prova de conceito, indicando que um dispositivo contendo a composição nominal SnO_2 + 5% BCSO foi capaz de apresentar desempenho superior ao melhor dispositivo de referência SnO_2 nas condições investigadas. Estudos posteriores deverão avaliar sistematicamente a variabilidade dispositivo-a-dispositivo e a reprodutibilidade entre diferentes lotes de fabricação.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

4.7. Correlação entre as Propriedades dos Materiais e o Desempenho Fotovoltaico

A análise conjunta dos resultados permite estabelecer uma correlação entre a incorporação do $BaCuSi_4O_{10}$ e o desempenho das DSSCs. A espectroscopia Raman confirma as assinaturas vibracionais características dos materiais empregados, enquanto o EDS do BCSO evidencia a presença de Ba, Cu, Si e O. As micrografias demonstram que a incorporação de 5% do silicato modifica a morfologia do filme sem eliminar a estrutura porosa necessária para o funcionamento do fotoânodo.

Paralelamente, a caracterização óptica mostra uma alteração da resposta espectral após a introdução do BCSO. Essas mudanças são acompanhadas por um incremento de aproximadamente 32% em Jsc, passando de 6,10 para 8,05 mA cm^{-2}, enquanto Voc permanece praticamente inalterado.

Esse conjunto de resultados sugere que o BCSO atua principalmente como um modificador funcional do fotoânodo de SnO_2, alterando suas características morfológicas e ópticas e favorecendo a resposta fotovoltaica do dispositivo. Contudo, não é possível, com as técnicas empregadas neste estudo, determinar quantitativamente a contribuição individual de mecanismos como aumento da adsorção de N719, espalhamento de luz, transferência interfacial de carga ou alteração da recombinação eletrônica.

Mesmo com essa limitação, a comparação direta entre fotoânodos preparados nas mesmas condições pela técnica *Doctor Blade* demonstra que a incorporação de apenas 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ é suficiente para produzir uma alteração mensurável no comportamento fotovoltaico das DSSCs baseadas em SnO_2. Os resultados, portanto, apontam para o potencial dos silicatos de cobre alcalino-terrosos como materiais funcionais para a modificação de fotoânodos semicondutores.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi investigada a incorporação de 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ (BCSO) em fotoânodos de SnO_2 preparados pela técnica *Doctor Blade*, visando avaliar os efeitos dessa modificação sobre as propriedades morfológicas, ópticas e fotovoltaicas de células solares sensibilizadas por corante (DSSCs). A análise conjunta dos resultados demonstrou que a introdução de uma pequena quantidade de BCSO é capaz de modificar as características do fotoânodo e produzir uma resposta fotovoltaica distinta daquela observada para o SnO_2 puro.

Os resultados obtidos para a composição nominal contendo 5% em massa de BCSO indicam potencial para continuidade da investigação desse sistema, sendo necessários estudos com diferentes concentrações para estabelecer a influência do teor de BCSO sobre o desempenho fotovoltaico.

A espectroscopia Raman evidenciou as assinaturas vibracionais características dos materiais investigados, enquanto a análise por EDS do BCSO confirmou a presença dos elementos Ba, Cu, Si e O. As micrografias obtidas por MEV mostraram que os fotoânodos apresentam morfologia rugosa e porosa, constituída por partículas aglomeradas. A incorporação de 5% de BCSO promoveu alterações na organização morfológica da camada sem eliminar sua estrutura porosa, característica relevante para a interação entre o fotoânodo, o sensibilizador N719 e o eletrólito.

A caracterização óptica por UV–Vis–NIR evidenciou alterações na resposta espectral após a incorporação do BCSO, particularmente na região visível, demonstrando a contribuição óptica do $BaCuSi_4O_{10}$ para o sistema compósito. Esses resultados, associados às diferenças morfológicas observadas, indicam que o BCSO atua como um modificador funcional da matriz de SnO_2.

O efeito mais significativo foi observado no desempenho fotovoltaico. A densidade de corrente de curto-circuito (Jsc) aumentou de aproximadamente 6,10 mA cm^{-2} para o SnO_2 puro para 8,05 mA cm^{-2} no fotoânodo contendo 5% de BCSO, correspondendo a um incremento de aproximadamente 32%. A tensão de circuito aberto (Voc), por sua vez, permaneceu praticamente inalterada, passando de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

aproximadamente 0,504 para 0,508 V. Além disso, o fator de preenchimento (FF) aumentou de aproximadamente 0,42 para 0,56, enquanto a eficiência de conversão de potência (η) passou de aproximadamente 1,30% para 2,31%, correspondendo a um aumento relativo de cerca de 78% na eficiência do melhor dispositivo. Esses resultados demonstram que a melhoria do desempenho fotovoltaico promovida pela incorporação do BCSO está associada principalmente ao aumento da fotocorrente e do fator de preenchimento, sem alteração substancial da tensão de circuito aberto.

Embora as alterações morfológicas e ópticas observadas possam contribuir para o aumento de Jsc e para a melhoria global do desempenho fotovoltaico, os resultados disponíveis não permitem atribuir esses efeitos a um único mecanismo. Aspectos como maior adsorção do sensibilizador, aumento do espalhamento óptico, alterações na transferência interfacial de cargas e redução dos processos de recombinação requerem investigações complementares antes que suas contribuições possam ser estabelecidas quantitativamente.

Deve-se destacar ainda que foram fabricadas cinco DSSCs independentes para cada composição e que os parâmetros discutidos correspondem aos dispositivos de melhor desempenho de cada conjunto experimental. Portanto, os valores apresentados representam os melhores dispositivos obtidos e não valores médios acompanhados de análise estatística. Consequentemente, o aumento relativo de aproximadamente 78% na eficiência deve ser interpretado como uma comparação entre os melhores dispositivos obtidos experimentalmente para cada composição.

Em conjunto, os resultados demonstram que a incorporação de 5% em massa de $BaCuSi_4O_{10}$ em fotoânodos de SnO_2 constitui uma estratégia promissora para melhorar o desempenho de DSSCs, preservando a estrutura porosa do fotoânodo e promovendo modificações em suas propriedades ópticas. Nas condições investigadas, o melhor dispositivo contendo BCSO apresentou Jsc de 8,05 mA cm^{-2}, Voc de 0,508 V, FF de 0,56 e eficiência de 2,31%, em comparação com 6,10 mA cm^{-2}, 0,504 V, 0,42 e 1,30%, respectivamente, para o melhor dispositivo baseado em SnO_2 puro. Além disso, o emprego da técnica *Doctor Blade* oferece uma rota

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

simples e de baixo custo para a fabricação desses fotoânodos compósitos. Estudos futuros envolvendo espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), eficiência quântica externa/IPCE, quantificação da adsorção do N719 e ensaios de estabilidade poderão esclarecer os mecanismos responsáveis pela melhoria observada e estabelecer com maior precisão o potencial do sistema SnO_2/BCSO para aplicações fotovoltaicas.

Referências

AGRAWAL, A.; SIDDIQUI, S. A.; SONI, A.; KHANDELWAL, K.; SHARMA, G. D. Performance analysis of TiO_2 based dye sensitized solar cell prepared by screen printing and doctor blade deposition techniques. *Solar Energy*, v. 226, p. 9–19, 2021. DOI: 10.1016/j.solener.2021.08.001.

AHMADI, M.; MIRZAEE, O.; JAFARI, M. The role of physical techniques on the preparation of photoanodes for dye sensitized solar cells. *International Journal of Photoenergy*, v. 2014, Article ID 198734, 2014. DOI: 10.1155/2014/198734.

BERKE, H. The invention of blue and purple pigments in ancient times. *Chemical Society Reviews*, v. 36, n. 1, p. 15–30, 2007. DOI: 10.1039/B606268G.

CHEN, Y.; SHANG, M.; WU, X.; FENG, S. Hydrothermal synthesis, hierarchical structures and properties of blue pigments $SrCuSi_4O_{10}$ and $BaCuSi_4O_{10}$. *CrystEngComm*, v. 16, p. 5418–5423, 2014. DOI: 10.1039/C3CE42394H.

CHEN, W.; SHI, Y.; CHEN, Z.; SANG, X.; ZHENG, S.; LIU, X.; QIU, J. Near-infrared emission and photon energy upconversion of two-dimensional copper silicates. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 119, n. 35, p. 20571–20577, 2015. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b04819.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

HAGFELDT, A.; BOSCHLOO, G.; SUN, L.; KLOO, L.; PETTERSSON, H. Dye-sensitized solar cells. *Chemical Reviews*, v. 110, n. 11, p. 6595–6663, 2010. DOI: 10.1021/cr900356p.

ITO, S.; CHEN, P.; COMTE, P.; NAZEERUDDIN, M. K.; LISKA, P.; PÉCHY, P.; GRÄTZEL, M. Fabrication of screen-printing pastes from TiO_2 powders for dye-sensitised solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 15, n. 7, p. 603–612, 2007. DOI: 10.1002/pip.768.

JOHNSON-MCDANIEL, D.; SALGUERO, T. T. Exfoliation of Egyptian blue and Han blue, two alkali earth copper silicate-based pigments. *Journal of Visualized Experiments*, n. 86, e51686, 2014. DOI: 10.3791/51686.

KHAIRUDIN, A. R. M.; AZIZ, N. A. S.; RAHMAN, M. Y. A.; UMAR, A. A. Metal oxide and its modification as photoanode for dye-sensitized solar cell: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 37, art. 936, 2026. DOI: 10.1007/s10854-026-17282-0.

KORIR, B. K.; KIBET, J. K.; NGARI, S. M. A review on the current status of dye-sensitized solar cells: toward sustainable energy. *Energy Science & Engineering*, v. 12, p. 3188–3226, 2024. DOI: 10.1002/ese3.1815.

NAZEERUDDIN, M. K.; KAY, A.; RODICIO, I.; HUMPHRY-BAKER, R.; MÜLLER, E.; LISKA, P.; VLACHOPOULOS, N.; GRÄTZEL, M. Conversion of light to electricity by cis-X_2bis(2,2′-bipyridyl-4,4′-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl^-, Br^-, I^-, CN^-, and SCN^-) on nanocrystalline TiO_2 electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, v. 115, n. 14, p. 6382–6390, 1993. DOI: 10.1021/ja00067a063.

O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

sensitized colloidal TiO_2 films. *Nature*, v. 353, p. 737–740, 1991. DOI: 10.1038/353737a0.

QUINTANA, M.; EDVINSSON, T.; HAGFELDT, A.; BOSCHLOO, G. Comparison of dye-sensitized ZnO and TiO_2 solar cells: studies of charge transport and carrier lifetime. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 111, n. 2, p. 1035–1041, 2007. DOI: 10.1021/jp065948f.

SELVAGGIO, G.; WEITZEL, M.; OLEKSIIVETS, N.; OSWALD, T. A.; NISSLER, R.; MEY, I.; KARIUS, V.; ENDERLEIN, J.; TSUKANOV, R.; KRUSS, S. Photophysical properties and fluorescence lifetime imaging of exfoliated near-infrared fluorescent silicate nanosheets. *Nanoscale Advances*, v. 3, p. 4541–4553, 2021. DOI: 10.1039/D1NA00238D.

SELVAGGIO, G.; KRUSS, S. Preparation, properties and applications of near-infrared fluorescent silicate nanosheets. *Nanoscale*, v. 14, p. 9553–9575, 2022. DOI: 10.1039/D2NR02967G.

TAUC, J.; GRIGOROVICI, R.; VANCU, A. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica Status Solidi (b)*, v. 15, n. 2, p. 627–637, 1966. DOI: 10.1002/pssb.19660150224.

WALI, Q.; FAKHARUDDIN, A.; JOSE, R. Tin oxide as a photoanode for dye-sensitised solar cells: current progress and future challenges. *Journal of Power Sources*, v. 293, p. 1039–1052, 2015. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.06.037.

WALI, Q.; JOSE, R. SnO_2 dye-sensitized solar cells. In: **THOMAS, S.; SAKHO, E. H. M.; KALARIKKAL, N.; OLUWAFEMI, O. S.; WU, J.** (eds.). *Nanomaterials for Solar Cell Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 205–285. DOI: 10.1016/B978-0-12-813337-8.00007-2.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 15/07/2026 - **Accepted:** 20/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/8fcms413
Pages: 1-44

YE, M.; WEN, X.; WANG, M.; IOCOZZIA, J.; ZHANG, N.; LIN, C.; LIN, Z. Recent advances in dye-sensitized solar cells: from photoanodes, sensitizers and electrolytes to counter electrodes. *Materials Today*, v. 18, n. 3, p. 155–162, 2015. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.09.001.

ZHANG, C.; ZHANG, N.; WANG, X.; ZHANG, L. Novel preparation of an ancient ceramic pigment $BaCuSi_4O_{10}$ and its performance investigation. *Materials Research Bulletin*, v. 101, p. 334–339, 2018. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.02.002.

CC BY