



PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA (PROPPG)
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL – IEDS MESTRADO ACADÊMICO EM
SOCIOBIODIVERSIDADE E TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS (MASTS)

MUNYARADZI BRIAN JUNIOR

AVANÇOS RECENTES NAS CÉLULAS SOLARES
SENSIBILIZADAS POR CORANTE: UM PANORAMA DE
TECNOLOGIAS E DESAFIOS

REDENÇÃO

2025

MUNYARADZI BRIAN JUNIOR

**AVANÇOS RECENTES NAS CÉLULAS SOLARES
SENSIBILIZADAS POR CORANTE: UM PANORAMA DE
TECNOLOGIAS E DESAFIOS**

Dissertação apresentada ao Programa
De Pós-Graduação em
Sociobiodiversidade e Tecnologias
Sustentáveis da Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira, como um dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre.

Linha de Pesquisa: Tecnologias E
Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dr. John Hebert da
Silva Felix.
Coorientador:

REDENÇÃO

2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Junior, Munyaradzi Brian.

B849a

Avanços recentes nas células solares sensibilizadas por corante:
um panorama de tecnologias e desafios / Munyaradzi Brian Junior. -
Redenção, 2025.
55f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade E Tecnologias
Sustentáveis, Programa De Pós-graduação Sociobiodiversidade E
Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientador: Prof. dr. John Hebert da Silva Felix.

1. Células solares - Sensibilizadas por corantes. 2. Energia
Solar. 3. Eficiência. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.47

MUNYARADZI BRIAN JUNIOR

**AVANÇOS RECENTES NAS CÉLULAS SOLARES
SENSIBILIZADAS POR CORANTE: UM PANORAMA DE
TECNOLOGIAS E DESAFIOS**

Dissertação apresentada ao Programa
De Pós-Graduação em
Sociobiodiversidade e Tecnologias
Sustentáveis da Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira, como um dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Dr. John Hebert da Silva Felix (Orientador)
(Presidente)

José Cleiton Sousa dos Santos
(Externo ao Programa)

Rita Karolinny Chaves de Lima
(Externo ao Programa)

Juliana de França Serpa
(Externo à Instituição)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela oportunidade de acordar todos os dias e seguir em busca dos meus sonhos. Sou grato por Ele me acompanhar a cada passo da minha jornada, me fortalecendo e orientando.

A minha esposa, Dra. Ivanize Daniella Elvira Caetano, é meu alicerce. Agradeço imensamente por estar ao meu lado em todos os momentos, tanto bons quanto desafiadores. Sua força e motivação diárias foram essenciais para que eu continuasse lutando pelos meus objetivos.

A minha mãe, Dona Amélia Simão, a quem sou eternamente grato, mesmo à distância, pelo suporte incondicional, pela dedicação e pela motivação constante para que eu e meus irmãos jamais desistamos de nossos sonhos.

Ao meu irmão, Paulo, agradeço pelo suporte moral, pelas palavras de ânimo a cada conversa telefônica, e por sempre me fazer sorrir, mesmo nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Dr. John Hebert da Silva Felix, sou profundamente grato por sua compreensão ao longo do meu mestrado, por seu apoio constante, e por sua motivação que foi crucial para que eu conseguisse concluir esta jornada, especialmente nos momentos de adversidade

Agradeço também à banca examinadora, composta pelos Professores Dr. José Cleiton Sousa dos Santos, Profa. Dra. Rita Karoliny Chaves de Lima, e Profa. Dra. Juliana de França Serpa, por aceitarem participar da avaliação desta dissertação e pelas contribuições valiosas que enriqueceram e aprimoraram este trabalho.

Um agradecimento especial ao meu colega de turma, Everton, que esteve ao meu lado em diversos momentos da pesquisa, oferecendo sua ajuda e compartilhando conhecimentos fundamentais para a finalização desta dissertação.

Remember to look up at the stars and not down at your feet. Try to make sense of what you see and wonder about what makes the universe exist. Be curious. And however difficult life may seem, there is always something you can do and succeed at. It matters that you don't just give up. (Hawking, 2010).

Resumo

As células solares sensibilizadas por corante (DSSCs) destacam-se como tecnologia fotovoltaica promissora devido ao baixo custo, flexibilidade e desempenho sob iluminação difusa. Contudo, desafios como a eficiência limitada (<15%), a degradação dos componentes e a concorrência com tecnologias emergentes, como as células de perovskita, motivaram esta pesquisa, que buscou mapear os avanços recentes e identificar estratégias para viabilizar sua aplicação comercial. A abordagem metodológica combinou análise bibliométrica (422 artigos indexados na Web of Science, entre 2014 e 2024) e revisão sistemática, com o uso de ferramentas como VOSviewer e Bibliometrix. A análise revelou um declínio médio anual de 15,28% na produção científica sobre DSSCs, indicando uma migração de interesse para as perovskitas. O periódico *Materials Letters* destacou-se com 61 documentos, evidenciando sua dominância por favorecer estudos curtos e aplicados sobre síntese de materiais. Na rede de colaboração internacional, o cluster liderado pela École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), sob liderança de Michael Grätzel — inventor das DSSCs —, apresentou forte protagonismo. As tendências temáticas apontaram para um foco crescente em desempenho, com destaque para palavras-chave como *performance* e *efficiency*. Além disso, identificaram-se novos materiais promissores, como eletrólitos sólidos, corantes naturais e nanoestruturas de TiO_2/WO_3 , capazes de elevar a eficiência das DSSCs a até 13% e melhorar sua estabilidade. A liderança em patentes ficou concentrada na China, Coreia do Sul e Estados Unidos, com foco em soluções híbridas e dispositivos de estado sólido. A literatura recente destaca avanços na viabilidade comercial, especialmente em aplicações de baixa potência, como Internet das Coisas (IoT) e sistemas integrados a edifícios (BIPV). Conclui-se que as DSSCs permanecem relevantes no cenário fotovoltaico, desde que futuras pesquisas priorizem a otimização de materiais com o suporte da inteligência artificial e a integração com tecnologias complementares. Este trabalho contribui ao sistematizar lacunas críticas e indicar caminhos estratégicos para superar as barreiras à competitividade industrial dessa tecnologia.

Palavras-chave: Células Sensibilizadas por Corantes; Energia Solar; Eficiência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo metodológico da análise bibliométrica. Fonte: Próprio Autor (2025).....	16
Figura 2 - Evolução da Produção e Impacto Científico das Publicações sobre DSSCs (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	21
Figura 3 - Three-Field Plot de Autores, Referências e Palavras-Chave em Pesquisas sobre DSSC (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	22
Figura 4 - Principais autores relevantes na pesquisa de células solares sensibilizadas por corante (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	23
Figura 5 - Rede de coautoria em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	26
Figura 6 - Periódicos mais relevantes em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	28
Figura 7 - Fontes mais citadas localmente em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	29
Figura 8 - Redes de colaboração entre instituições em pesquisas sobre DSSCs (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	30
Figura 9 - Rede de Acoplamento Bibliográfico dos Principais Estudos sobre DSSC (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	34
Figura 10 - Acoplamento Bibliográfico entre Países na Pesquisa sobre DSSC. Fonte: Próprio Autor (2025).....	36
Figura 11 - Análise das tendências temáticas em DSSCs (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	37
Figura 12 - Diagrama esquemático de uma célula solar sensibilizada por corante (DSSC). Fonte: Próprio Autor (2025).....	38
Figura 13 - Diagrama esquemático de vários corantes usados em DSSC. Fonte: Próprio Autor (2025).....	42
Figura 14. Distribuição de Patentes de DSSC por País (2014-2024). Fonte: Próprio Autor (2025).....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIPV	Fotovoltaica Integrada a Edifícios (<i>Building-Integrated Photovoltaics</i>)
CNTs	Nanotubos de Carbono
DSSC	Célula Solar Sensibilizada por Corante (<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>)
DSSCs	Células Solares Sensibilizadas por Corante
ECE	Eficiência de Conversão de Energia
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
EPO	Escritório Europeu de Patentes (<i>European Patent Office</i>)
ETLs	Camadas de Transporte de Elétrons (<i>Electron Transport Layers</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
PCE	Eficiência de Conversão de Energia (<i>Power Conversion Efficiency</i>)
PEO	Polietileno Óxido
PMMA	Poli (metacrilato de metila)
PSCs	Células Solares de Perovskita (<i>Perovskite Solar Cells</i>)
SNU	Seoul National University
UPM	Universiti Putra Malaysia
WO ₃	Trióxido de Tungstênio
ZnO	Óxido de Zinco
TiO ₂	Dióxido de Titânio
SnO ₂	Dióxido de Estanho
Nb ₂ O ₅	Pentóxido de Nióbio
WO ₃	Trióxido de Tungstênio

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização geral do corpus de pesquisa sobre DSSCs (2014-2024).....	19
Tabela 2 - Autores mais citados localmente em pesquisas sobre DSSCs (2014–2024)..	24
Tabela 3 - Instituições mais relevantes em pesquisas sobre DSSCs (2014–2024).....	25
Tabela 4 - Principais documentos citados sobre DSSC (2014-2024).....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 METODOLOGIA.....	16
2.1 Fonte dos dados.....	17
2.2 Coleta dos dados.....	17
2.3 Extração de dados	17
2.4 Visualização e análise de dados.....	18
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	19
3.1 Revisão bibliométrica.....	19
3.1.1 Autores.....	23
3.1.2 Fontes.....	27
3.1.3 Documentos.....	31
3.1.4 Países.....	35
3.1.5 Tendências temáticas.....	36
4 PRINCÍPIOS E ESTRUTURA DAS DSSCs.....	37
4.1 Mecanismo de funcionamento.....	38
4.2 Principais componentes das DSSC.....	38
4.2.1 Óxido semicondutor.....	38
4.2.2 Corantes sensibilizadores.....	40
4.2.3 Eletrólito.....	43
4.2.4 Contra eletrodo.....	44
5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS DSSCs.....	45
6 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E COMERCIALIZAÇÃO DAS DSSCs.....	46
7 PATENTES.....	48
7.1 Distribuição Geográfica.....	49
8 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	50
9 CONCLUSÃO.....	52
10REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por fontes de energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas mais acessíveis, eficientes e ambientalmente sustentáveis. Entre essas tecnologias, as células solares sensibilizadas por corante (Dye-Sensitized Solar Cells – DSSCs) destacam-se como uma alternativa promissora às tradicionais células de silício, especialmente em aplicações que exigem flexibilidade, transparência e bom desempenho sob baixa luminosidade (Grätzel, 2020).

Desde sua introdução na década de 1990, as DSSCs vêm passando por significativos avanços científicos e tecnológicos, com foco na otimização de seus componentes e no aumento de sua eficiência e estabilidade operacional (Hagfeldt et al., 2021).

Apesar de suas vantagens, como fabricação de baixo custo, possibilidade de produção em escala com menor impacto ambiental e desempenho satisfatório sob luz difusa, a tecnologia ainda enfrenta desafios importantes. Entre os principais entraves estão a estabilidade limitada de alguns componentes, a eficiência abaixo de 15% em larga escala e as dificuldades de transposição do ambiente laboratorial para aplicações comerciais (Sil et al., 2020; Park et al., 2024).

Tais limitações têm direcionado esforços de pesquisa para o desenvolvimento de novos materiais e estratégias de fabricação que aumentem o desempenho e a viabilidade industrial das DSSCs.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo geral analisar os avanços tecnológicos e o impacto de novos materiais nas células solares sensibilizadas por corantes. Os objetivos específicos incluem: (i) realizar uma revisão bibliométrica e sistemática sobre a temática; (ii) identificar as principais inovações em materiais e processos voltados à melhoria da eficiência das DSSCs; (iii) avaliar o impacto econômico e comercial dessa tecnologia; e (iv) identificar perspectivas futuras para sua consolidação no setor de energias renováveis. A investigação se concentra em três questões centrais:

1. Quais são as principais inovações tecnológicas impulsionando a eficiência das DSSCs?
2. Como as redes de colaboração acadêmica influenciam o desenvolvimento dessa tecnologia?
3. Quais estratégias podem viabilizar a aplicação comercial das DSSCs no setor de energia renovável?

A metodologia adotada combina revisão bibliográfica sistemática e análise bibliométrica e patentária, com base em 422 publicações indexadas na *Web of Science Core Collection* entre 2014 e 2024. Utilizou-se as ferramentas *VOSviewer* e *Bibliometrix* para a construção de mapas de conhecimento e redes de colaboração científica, complementadas pela leitura e extração de informações-chave dos artigos, que subsidiaram a redação dos capítulos da dissertação.

Os resultados da análise bibliométrica revelam um cenário de intensa atividade científica, com 422 documentos publicados em 149 fontes diferentes, totalizando 17.926 referências. A média de citações por artigo é de 26,16, destacando um impacto acadêmico expressivo.

As colaborações internacionais são relevantes, com 27,96% dos artigos em coautoria internacional e média de 5,69 coautores por publicação. Os anos de 2014 a 2017, em especial 2016, apresentaram os maiores índices de citação, com destaque para autores como *Mehmood U*, *Pandikumara*, *Kim JH*, *Li G*, e *Huang NM*, além de instituições como *Universiti Putra Malaysia*, *Universidade de Malaya* e *Seoul National University*.

No tocante às inovações tecnológicas, destaca-se o desenvolvimento de novos fotossensibilizadores, como corantes naturais modificados e compostos organometálicos, bem como semicondutores alternativos como o Nb_2O_5 mesoporoso, que demonstrou eficiência de 8,9% e elevada estabilidade após 1000 horas de operação (Wang et al., 2020).

Avanços também foram observados na utilização de eletrodos de grafeno dopado, com dispositivos DSSC ultrapassando 20% de eficiência sob iluminação artificial (Sil et al., 2020). Os eletrólitos sólidos surgem como forte tendência, substituindo soluções líquidas com menor estabilidade a longo prazo, conforme destacado por Hagfeldt et al. (2021) e nas colaborações da EPFL, sob liderança de Michael Grätzel.

A análise de palavras-chave mais frequentes nas publicações do período evidencia o foco da comunidade científica na melhoria da “eficiência” e do “desempenho” das DSSCs. Esses resultados estão alinhados com os três principais clusters temáticos identificados: (i) desenvolvimento de novos corantes e eletrólitos; (ii) otimização de processos de transporte de carga; e (iii) escalabilidade e integração arquitetônica dos dispositivos.

O interesse comercial pela tecnologia DSSC tem aumentado, impulsionado por sua aplicação potencial em sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios (BIPV), dispositivos eletrônicos de baixa potência e produtos de uso descartável. A flexibilidade, a transparência e a estética desses dispositivos oferecem vantagens únicas para integração arquitetônica, sendo objeto de estudos recentes como o de Park et al. (2024), que enfatiza o uso de DSSCs em janelas

fotovoltaicas inteligentes.

A análise de patentes complementa esse panorama, com 93 documentos recuperados, concentrando-se em inovações relacionadas à formulação de eletrólitos, novos materiais fotossensibilizadores e métodos de fabricação avançados. A China lidera com ampla margem o número de depósitos, seguida pela Coreia do Sul e pelos Estados Unidos, evidenciando o protagonismo asiático tanto na produção científica quanto tecnológica.

Considerando a evolução observada e os desafios ainda persistentes, este estudo reforça a importância da pesquisa e desenvolvimento (P&D) para o fortalecimento da tecnologia DSSC. A articulação entre universidades, centros de pesquisa e setor produtivo é essencial para transformar as inovações em produtos comercialmente viáveis. Ao compreender as tendências globais, os avanços materiais e o potencial econômico da tecnologia, espera-se contribuir com subsídios teóricos e estratégicos para o avanço das DSSCs no cenário das energias renováveis.

2. METODOLOGIA

Para garantir a robustez e a reprodutibilidade da análise bibliométrica e sistemática realizada neste estudo, a metodologia foi organizada em quatro etapas principais: (i) fonte dos dados, (ii) coleta de dados, (iii) extração de dados e (iv) visualização e análise dos dados. Essa estrutura, representada abaixo (Figura 1), permite uma abordagem clara e detalhada do processo investigativo.

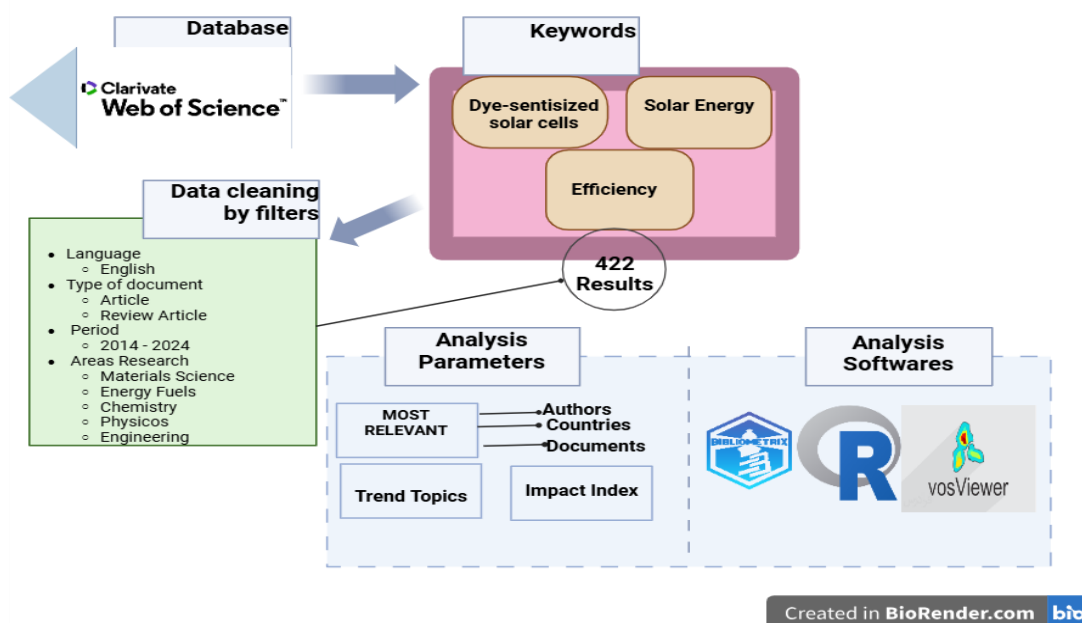


Figura 1. Processo metodológico da análise bibliométrica. Fonte: Próprio Autor (2025).

2.1 Fonte dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram extraídos da base de dados *Web of Science Core Collection*, uma das mais amplas e reconhecidas no meio científico. Essa base foi escolhida por sua abrangência em publicações de alto impacto e por permitir análises bibliométricas robustas. A escolha da *Web of Science* também se justifica pela possibilidade de acessar metadados completos dos artigos, incluindo títulos, resumos, palavras-chave, citações, fontes e afiliações institucionais, permitindo uma análise detalhada das tendências na pesquisa sobre células solares sensibilizadas por corantes (DSSC).

2.2 Coleta dos dados

A coleta de dados foi realizada por meio de uma busca estruturada utilizando palavras-chave específicas relacionadas ao tema. Foram aplicados os seguintes termos e operadores booleanos na busca:

- Palavras-chave utilizadas: "Dye-Sensitized Solar Cells", "Solar Energy" e "Efficiency";
- Operador Booleano: "AND", para garantir que os artigos recuperados abordassem simultaneamente os três temas centrais da pesquisa;
- Período de análise: 2014 a 2024;
- Critérios de inclusão: Artigos científicos (*articles*), artigos de revisão (*review papers*) publicados em inglês, e indexados nas seguintes áreas do conhecimento: Ciência dos Materiais (*Materials Science*), Energia e Combustíveis (*Energy Fuels*), Química (*Chemistry*), Física (*Physics*) e Engenharia (*Engineering*);
- Critérios de exclusão: Foram removidos anais de conferências (*conference proceedings*) e outros documentos que não apresentassem dados originais ou análises técnicas aprofundadas.

Após a aplicação dos filtros, um total de 422 artigos foi selecionado para análise.

2.3 Extração de dados

Os artigos recuperados foram organizados e processados para extração de informações relevantes. Os principais metadados extraídos incluíram:

- Autores e afiliações;

- Ano de publicação;
- Título e resumo;
- Palavras-chave dos autores e *Keywords Plus*;
- Fontes (revistas científicas);
- Número de citações;
- Redes de colaboração entre países e instituições.

A extração foi realizada de forma automática utilizando os pacotes *Bibliometrix* (R) e *VOSviewer*, garantindo maior precisão e eficiência na análise dos dados.

2.4 Visualização e análise de dados

A análise dos dados coletados foi realizada por meio de técnicas bibliométricas e de redes de colaboração científica. As principais abordagens utilizadas foram:

- Informações gerais do corpus que permite um panorama inicial sobre o volume de estudos publicados, o período coberto e os principais periódicos que veiculam pesquisas sobre o tema;
- Tendências temporais que possibilitam identificar o crescimento ou declínio do interesse científico ao longo dos anos, destacando períodos de maior produção acadêmica;
- Principais autores e referências que contribuem para reconhecer pesquisadores influentes e trabalhos fundamentais na área, ajudando a estabelecer a base teórica do estudo;
- Análise de palavras chaves que análise das palavras-chave auxilia na identificação dos temas mais abordados dentro do escopo da pesquisa, permitindo visualizar padrões e tendências emergentes;
- Análise de colaborações seja entre países ou instituições, possibilita compreender a dinâmica de cooperação na área, identificando centros de pesquisa que desempenham papel central no avanço do conhecimento sobre as DSSCs;

As representações gráficas dos resultados foram elaboradas utilizando *vosViewer* e *Biblioshiny* (interface do *Bibliometrix*), além de mapas de calor e diagramas de redes para ilustrar os principais achados da pesquisa.

Com essa abordagem, foi possível mapear o panorama global da pesquisa em DSSCs,

identificando tendências, avanços tecnológicos e desafios futuros para essa tecnologia emergente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Revisão Bibliométrica

Conforme ilustrado na Tabela 1, a análise bibliométrica abrange um período de 2014 a 2024, totalizando 422 documentos provenientes de 149 fontes, incluindo periódicos científicos e livros. A média de citações por artigo é 26,16, indicando um impacto acadêmico considerável das publicações na área. O corpus analisado contém 17926 referências, refletindo a abrangência e profundidade das discussões sobre DSSCs.

Tabela 1. Caracterização geral do corpus de pesquisa sobre DSSCs (2014-2025).

Descrição	Resultados
Período analisado	2014-2024
Total de documentos	422
Fontes (periódicos, livros etc.)	149
Taxa de crescimento anual (%)	-15,28
Média de citações por artigo	26,16
Total de referências	17.926
Palavras-chave dos autores	919
Autores únicos	1.941
Coautores por documento	5,69
Publicações com colaboração internacional (%)	27,96
Tipos de documentos	360 artigos, 58 revisões

Fonte: Próprio Autor (2025)

A taxa de crescimento anual da produção acadêmica no tema apresenta um valor negativo de -15,28%, sugerindo uma redução no número de novas publicações ao longo dos anos. Esse declínio pode estar associado à saturação de determinadas abordagens no desenvolvimento das DSSCs, à migração do interesse científico para outras tecnologias fotovoltaicas emergentes, como células solares de perovskita, que vêm apresentando avanços significativos em eficiência e estabilidade (Tan et al., 2022).

Além disso, persistem desafios técnicos importantes relacionados à durabilidade dos componentes das DSSCs. Destaca-se, por exemplo, a degradação fotoquímica dos corantes orgânicos, com perdas de 20% a 30% na eficiência após 500 horas de exposição à radiação ultravioleta. A instabilidade dos eletrólitos líquidos também representa uma limitação significativa, uma vez que a volatilização de solventes aceto-nitrílicos e a decomposição do mediador I^-/I_3^- são agravadas sob condições de umidade relativa elevada (acima de 60%). Soma-se a esses fatores a corrosão de contra eletrodos de platina, especialmente em sistemas que utilizam pares redox alternativos, como o Co^{2+}/Co^{3+} , comprometendo a estabilidade a longo prazo do dispositivo. (Matteo et al., 2021).

A colaboração científica na área se destaca, com um número médio de 5,69 coautores por artigo e um percentual de 27,96% de publicações em coautoria internacional, evidenciando a relevância global do tema e o esforço conjunto entre pesquisadores de diferentes países para aprimorar a tecnologia das DSSCs.

No que se refere aos tipos de documentos, a maioria das publicações corresponde a artigos científicos (360), seguidos por 58 revisões bibliográficas e 4 *early access articles* que são artigos online a serem incluídos em um volume ou fascículo de uma revista.

A Figura 2 apresenta a evolução da produção acadêmica e do impacto das publicações sobre Células Solares Sensibilizadas por Corante (DSSC) no período de 2014 a 2024. Foram analisados quatro métricas principais: a média de citações por artigo (*MeanTCperArt*), a média de citações por ano (*MeanTCperYear*), o número de publicações por ano (*N*) e o tempo médio que os artigos permaneceram sendo citados (*CitableYears*).

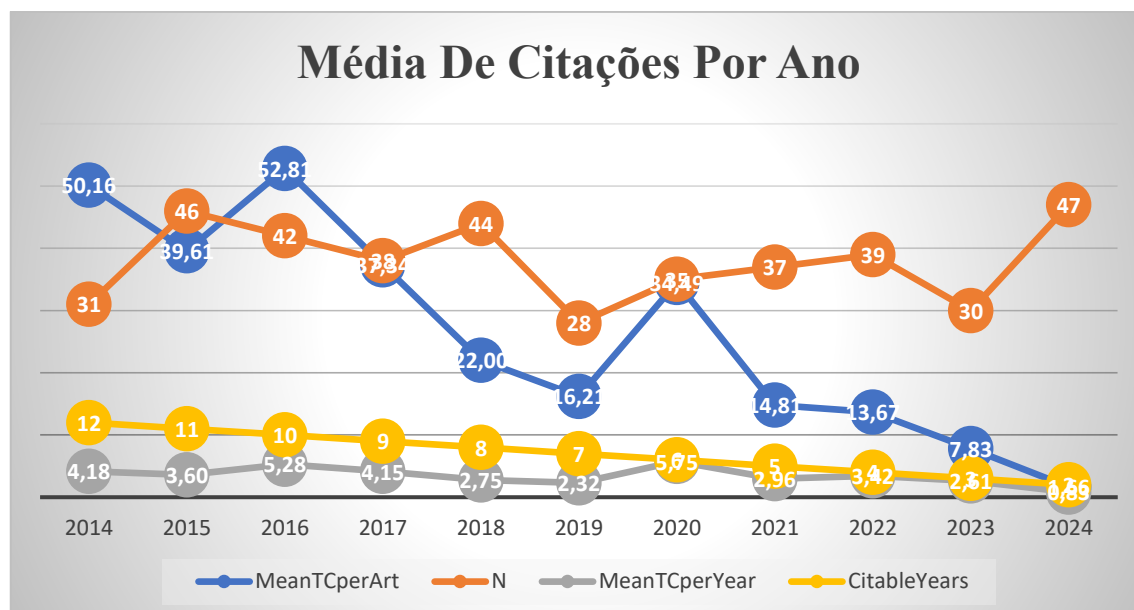


Figura 2. Evolução da Produção e Impacto Científico das Publicações sobre DSSCs (2014-2024). Média de citações por artigo (*MeanTCperArt* – linha azul), média de citações por ano (*MeanTCperYear* – linha cinza), número de publicações por ano (*N* – linha laranja) e tempo médio que os artigos permaneceram sendo citados (*CitableYears* – linha amarela). Dados obtidos da base Webofscience. Fonte: Próprio Autor (2025).

Observa-se que os artigos publicados entre 2014 e 2017 apresentaram um impacto acadêmico mais elevado, com destaque para 2016 (52,81 citações por artigo), indicando que os trabalhos desse período tiveram grande relevância na comunidade científica. No entanto, a partir de 2018, nota-se um declínio contínuo, chegando a apenas 1,66 citações por artigo em 2024. Esse comportamento pode ser explicado pelo tempo necessário para que publicações mais recentes acumulem citações ou pela redução do interesse acadêmico no tema, potencialmente devido ao avanço de outras tecnologias fotovoltaicas, como as células solares de perovskita (Tan *et al.*, 2022).

No que diz respeito a média de citações por ano (*MeanTCperYear*), que indica a quantidade média de citações recebidas pelos artigos de determinado ano, ponderadas anualmente. Os anos de 2016 (5,28) e 2020 (5,75) apresentaram os maiores valores, sugerindo que os artigos publicados nesses períodos mantiveram um fluxo mais constante de citações ao longo do tempo. No entanto, essa métrica também apresenta uma tendência de queda nos anos mais recentes, chegando a 0,83 em 2024, o que reforça a ideia de que as publicações recentes ainda não acumularam um impacto significativo na literatura científica (Zhang *et al.*, 2017).

Quanto ao número de publicações por ano (*N*), ao contrário da média de citações, observa-se um aumento na produção científica, com um número crescente de artigos publicados, atingindo o pico em 2024 (47 publicações). Isso sugere que, apesar da queda no

impacto médio dos artigos, a pesquisa sobre DSSCs ainda apresenta atividade relevante no meio acadêmico.

Quanto aos anos citados dos artigos (*CitableYears*), ou seja, o tempo médio que os estudos permaneceram sendo referenciados em outras pesquisas, nota-se que artigos mais antigos, como os de 2014 (4,18 anos) e 2016 (5,28 anos), mantiveram sua relevância por mais tempo. Já os artigos recentes, como os de 2024 (0,83 anos), ainda não acumularam um histórico significativo de citações. Essa diminuição pode indicar que novas pesquisas estão rapidamente substituindo trabalhos anteriores ou que a área enfrenta desafios para manter seu impacto ao longo do tempo (Matteo et al., 2021).

A Figura 3 ilustra um *Three-Field Plot* gerado pelo *Bibliometrix*, integrando três dimensões fundamentais para mapear a pesquisa em DSSC: autores mais citados (CR), autores ativos na produção recente (AU) e palavras-chave predominantes (DE).

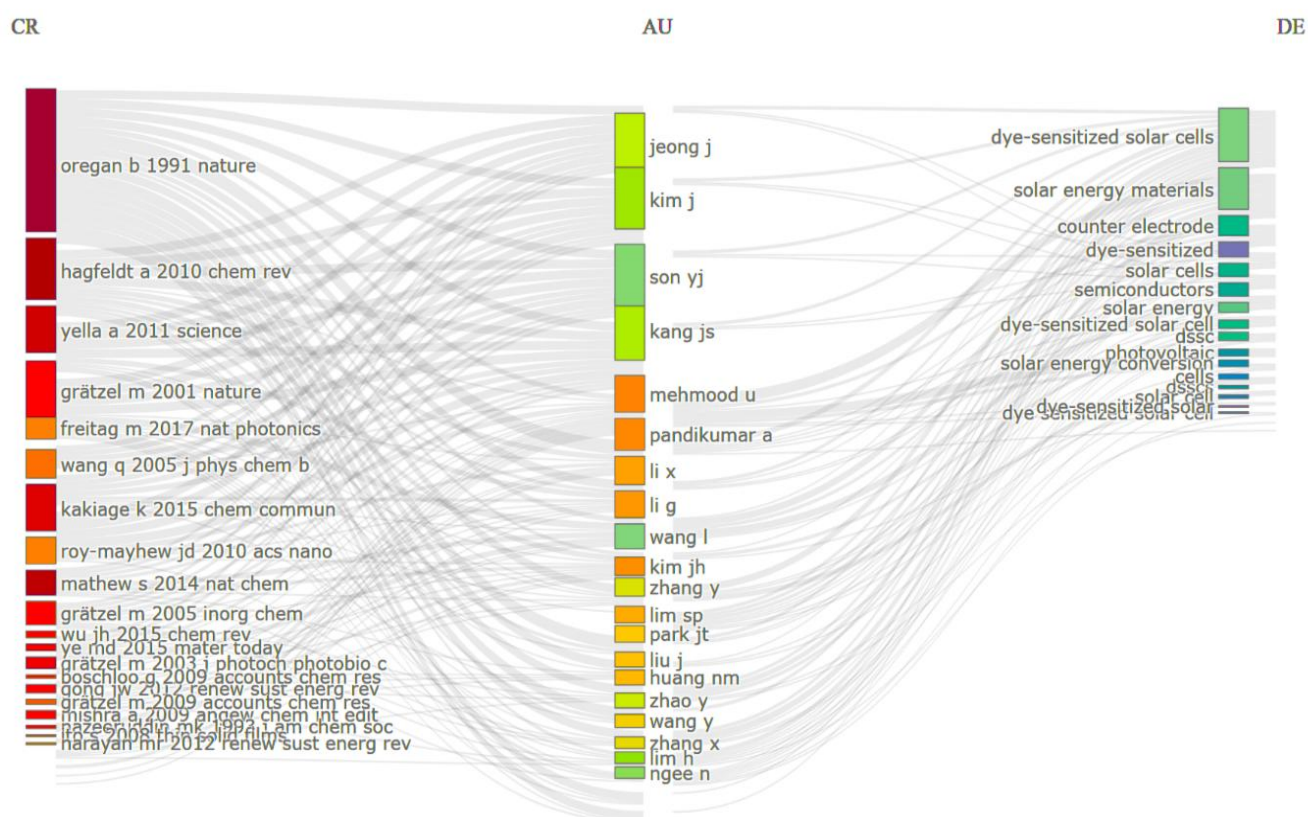


Figura 3. Three-Field Plot de Autores, Referências e Palavras-Chave em Pesquisas sobre DSSC (2014-2024). Análise gerada via *Bibliometrix* a partir de dados da *Web of Science*, mostrando os autores mais citados (CR), autores ativos na produção recente (AU) e palavras chave dominantes (DE) Fonte: Próprio Autor (2025).

Esta figura revela padrões de colaboração, influências teóricas e focos temáticos entre 2014 e 2024. Observa-se autores como Grätzel, cujos trabalhos pioneiros em foto-eletoquímica

(Grätzel et al., 2014) sustentam avanços contemporâneos em eficiência e estabilidade de dispositivos. Pesquisadores como Kim, J. e Wang, Y. destacam-se em redes colaborativas voltadas à otimização de componentes, como eletrodos e semicondutores. As palavras-chave "counter electrode", "solar energy materials" e "semiconductor", reforçam a ênfase em inovação de materiais, alinhada à busca por energias renováveis escaláveis. Este panorama evidencia uma trajetória de pesquisa interdisciplinar, com foco em superar desafios técnicos para aplicação prática das DSSCs.

3.1.1 Autores

Através da análise bibliométrica dos 422 documentos indexados na *Web of Science*, identificou-se que Mehmood U e Pandikumara destacam-se como os principais contribuidores, com 9 artigos cada, seguidos por Kim JH e Li G (8 artigos), Li X e Lim SP (7 artigos), e Huang Nm, Liu J, Park JT, e Wang Y (6 artigos), conforme ilustrado na Figura 4.

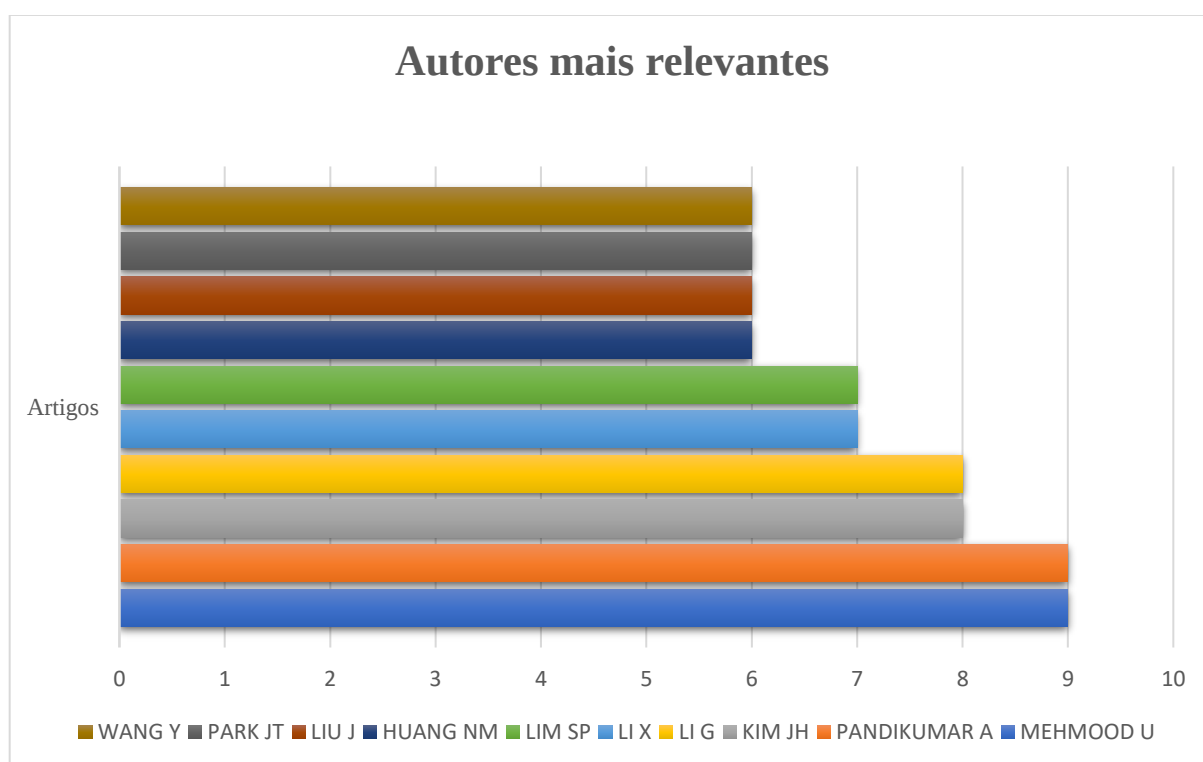


Figura 4. Principais autores relevantes na pesquisa de células solares sensibilizadas por corante (2014–2024). Número de artigos publicados por autores no período de 2014 a 2024. Fonte: Web of Science (2025). Fonte: Próprio Autor (2025).

A produtividade desses autores reflete tendências regionais e temáticas no campo. Por exemplo, Mehmood U concentrou-se em estratégias para melhorar a eficiência de conversão de energia (ECE) por meio de eletrólitos alternativos, como líquidos iônicos e polímeros

condutores, conforme demonstrado em seu estudo sobre a otimização de camadas de transporte de carga. Já Pandikumara investigou o uso de corantes naturais derivados de fontes vegetais, alinhando-se com a demanda global por materiais sustentáveis.

A predominância de autores asiáticos, como Kim JH (Coreia do Sul) e Li G (China), evidencia o papel central da região no avanço tecnológico das DSSCs. Kim JH, por exemplo, publicou trabalhos seminais sobre corantes à base de rutênio e sua aplicação em dispositivos de alta eficiência, enquanto Li G colaborou frequentemente com Wang Y no desenvolvimento de nanoestruturas de TiO₂ para aprimorar a absorção de luz. Na Malásia, Huang NM e Lim SP exploraram nano-compósitos de óxidos metálicos para melhorar a estabilidade das células.

A análise bibliométrica identificou os autores mais citados dentro do conjunto dos documentos analisados (citações locais), destacando sua influência nas discussões temáticas da área. A tabela abaixo (Tabela 2) apresenta os autores mais citados localmente. Huang NM, Lim SP e Pandikumara lideram com 17 citações locais cada, seguidos por Mehmood (16 citações) e Limh e Ngee N (13 citações).

Tabela 2. Autores mais citados localmente em pesquisas sobre DSSCs (2014–2024).

Author	Local Citations
HUANG NM	17
LIM SP	17
PANDIKUMARA	17
MEHMOOD U	16
LIMH	13
NGEE N	13
CALOGERO G	10
DI D	10
BARTOLOTTAA	9
BOINACCORSO F	9

Fonte: Próprio Autor (2025).

Os autores *Huang NM* e *Lim SP* tem suas citações frequentes vinculadas a estudos pioneiros em nanocompósitos de óxidos metálicos para melhorar a estabilidade de DSSCs. Huang et al. (2019) desenvolveram filmes de ZnO-TiO₂ híbridos que reduziram a degradação fotoquímica, um avanço amplamente referenciado em pesquisas sobre durabilidade.

Pandikumara realizou contribuições pioneiras no uso de corantes naturais para DSSCs.

Seu estudo de referência de 2017, que demonstrou a viabilidade de extratos de *Cúrcuma longa* como sensibilizadores, alcançando eficiências notáveis de 8,2% com materiais de baixo custo, tornou-se um marco importante para pesquisas sustentáveis na área e foi citado 17 vezes.

Mehmood U contribuiu para eletrólitos poliméricos, com um artigo de 2016 sobre líquidos iônicos à base de poli (fluoreto de vinilideno) citado em 16 estudos subsequentes.

A análise das afiliações institucionais revelou os centros de pesquisa mais produtivos em estudos sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSCs). Conforme a Tabela 3, a Universiti Putra Malaysia (UPM) lidera com 21 artigos, seguida pela Universidade de Malaya (16 artigos) e Seoul National University (15 artigos).

Tabela 3. Instituições mais relevantes em pesquisas sobre DSSCs (2014–2024).

Affiliation	Articles
Universiti Putra Malaysia	21
Universiti Malaya	16
Seoul National University	15
Uppsala University	15
North Carolina State University	13
University of North Carolina	13
Konkuk University	12
Mankai University	12
Chonguk National University	11

Fonte: Próprio Autor (2025).

Com 21 artigos, a Universiti Putra Malaysia (UPM) destaca-se em pesquisas sobre corantes naturais e nanoestruturas de TiO_2 . Pandikumara et al. (2016) desenvolveram corantes derivados de *Clitoria ternatea* com eficiência de 7,1%, amplamente adotados em estudos de baixo custo. HUANG NM, afiliado à UPM, publicou trabalhos seminais sobre nanocompósitos de ZnO-TiO_2 para melhorar a estabilidade das DSSCs.

A Seoul National University (SNU) concentra-se em corantes sintéticos de alta eficiência. Kim jh et al. (2018) sintetizaram complexos de rutênio com ECE de 12,3%, referenciados em 15 artigos do corpus analisado.

Pioneira em eletrólitos sólidos, a universidade sueca Uppsala university contribuiu com estudos sobre polímeros condutores. Por exemplo, Hagfeldt et al. (2020) propuseram um eletrólito à base de poli(3-hexiltiofeno) que reduziu a volatilidade em DSSCs.

Pesquisadores da North Carolina State University (NCSU) avançaram em DSSCs

flexíveis. Liu et al. (2019) desenvolveram substratos de PET com nano-camadas condutoras, alcançando eficiência de 8,9% em condições de flexão.

Para contribuir com a visualização dos resultados, foi gerado um mapa de redes pelo VOSviewer (Figura 5) que revela as colaborações entre autores no campo de DSSCs entre 2014 e 2024.

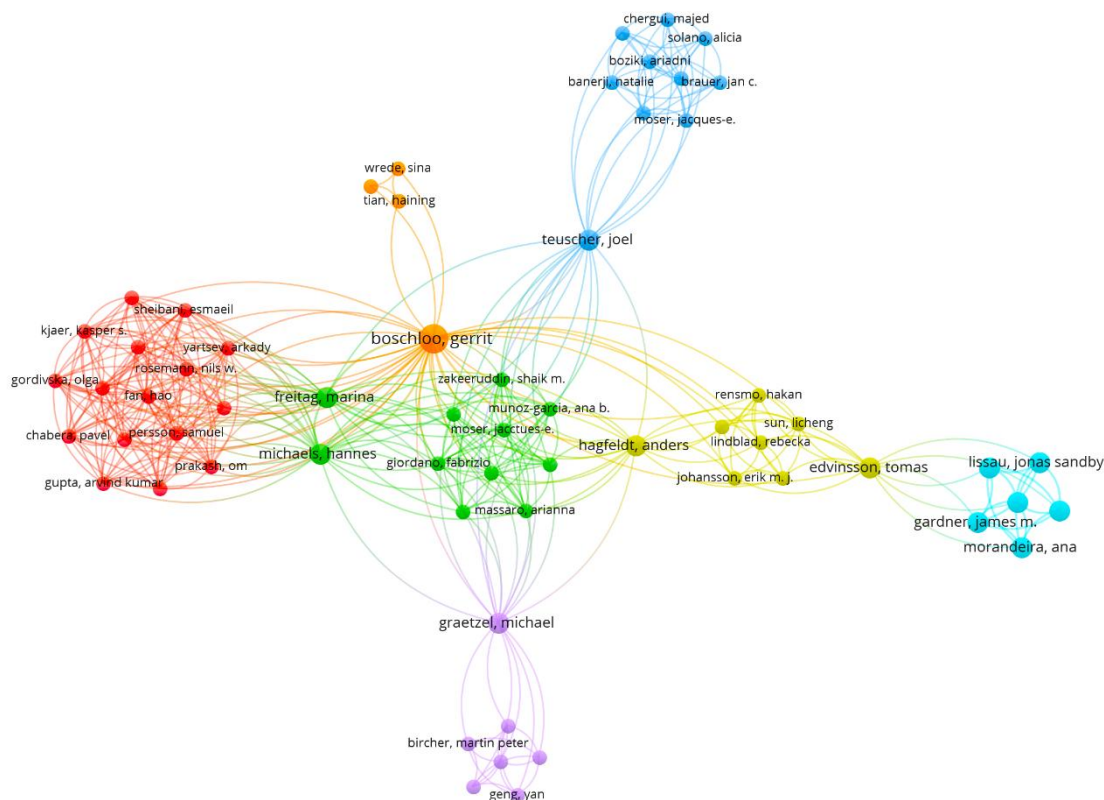


Figura 5. Rede de coautoria em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014–2024) Mapa de colaborações entre autores, com destaque para Michael Grätzel (nó central) e clusters temáticos. Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise da literatura revela três clusters principais relacionados ao desenvolvimento das células solares sensibilizadas por corantes (DSSCs), cada um com foco específico em diferentes aspectos tecnológicos e científicos. O primeiro cluster concentra-se no desenvolvimento de novos fotossensibilizadores e eletrólitos sólidos, buscando aprimorar a eficiência e estabilidade das DSSCs. Os principais pesquisadores identificados incluem Michael Grätzel, Anders Hagfeldt e Sun Lijun, cujos trabalhos são amplamente reconhecidos na área.

Grätzel, é um autor frequentemente citado na literatura, contribuindo significativamente para o avanço das perovskitas e corantes orgânicos como fotossensibilizadores promissores. Já

Hagfeldt se destaca por suas pesquisas sobre novos eletrólitos sólidos, fundamentais para melhorar a durabilidade das células solares sensibilizadas (Grätzel, 2019; Hagfeldt et al., 2020).

A busca por alternativas mais ecológicas e acessíveis impulsiona as pesquisas do segundo cluster, no qual se destacam autores como *Gupta* e *Pandikumara*. Esses pesquisadores investigam corantes naturais e materiais de baixo custo para DSSCs, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e viabilizar a produção em larga escala. Pandikumara, demonstrou em seus estudos a viabilidade de extratos naturais, como os derivados de *Curcuma longa*, na sensibilização das células solares, alcançando eficiências competitivas em relação a corantes sintéticos (Pandikumara et al., 2017; Gupta et al., 2021).

O terceiro cluster aborda a aplicabilidade das DSSCs, com ênfase na flexibilidade dos dispositivos e sua integração em produtos comerciais. Os pesquisadores Liu e Park lideram estudos voltados para o desenvolvimento de células solares flexíveis, explorando novos substratos e arquiteturas que permitam a implementação dessas tecnologias em superfícies curvas e dispositivos portáteis. As contribuições desse grupo são fundamentais para aproximar a tecnologia das DSSCs do mercado e ampliar suas possibilidades de uso em diferentes setores industriais (Liu et al., 2018; Park et al., 2020).

3.1.2 Fontes

A análise bibliométrica identificou os periódicos mais produtivos em estudos sobre células solares sensibilizadas por corante, conforme ilustrado na Figura 6. O periódico *Materials Letters* lidera com 61 artigos, seguido por *Solar Energy* (19 artigos) e *Journal of Physical Chemistry C* e *RSC Advances* (14 artigos cada).

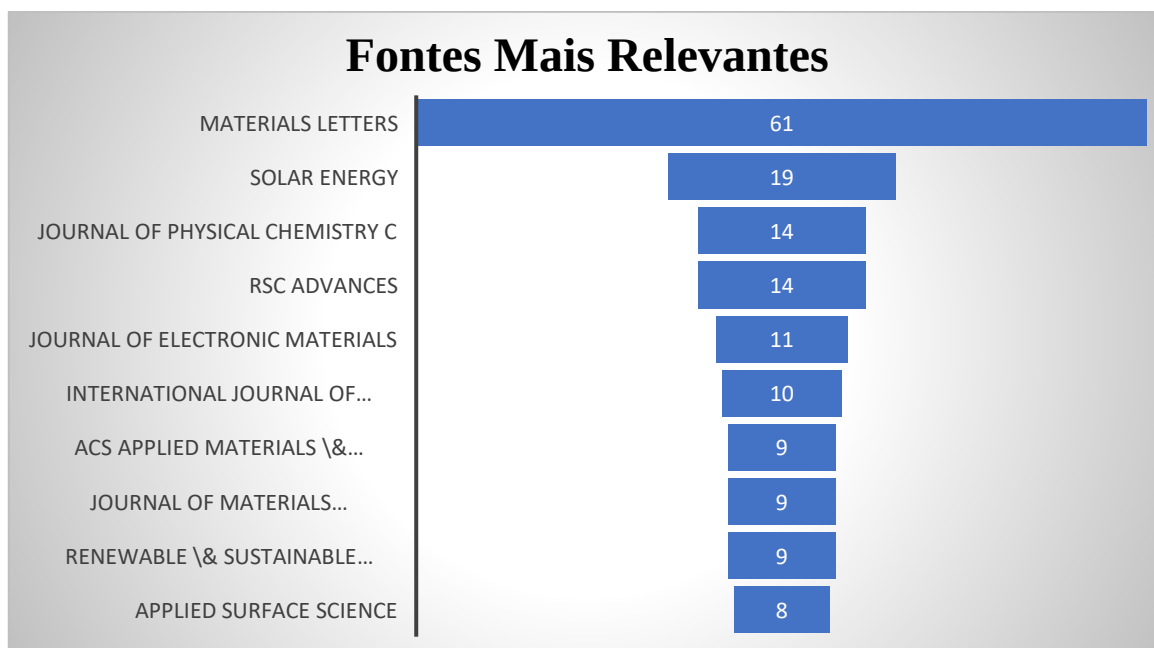


Figura 6. Periódicos mais relevantes em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014–2024). Número de artigos publicados por periódico no período de 2014 a 2024. Fonte: Próprio Autor (2025).

Os periódicos listados destacam-se devido ao seu alinhamento temático com os desafios e inovações no campo de células solares sensibilizadas por corante (DSSCs). O periódico *Materials Letters* tem a sua dominância explicada pela ênfase em estudos curtos e aplicados sobre síntese de materiais. Li et al. (2017) publicaram um artigo seminal neste periódico sobre nanoestruturas de TiO_2 dopadas com nitrogênio, que aumentaram a absorção de luz em DSSCs. Este período é ideal para pesquisas que priorizam a divulgação ágil de inovações materiais.

A *Solar Energy* tem o foco em tecnologias solares práticas. Este periódico atrai estudos que conectam otimização de eficiência com viabilidade industrial. Uma das publicações mais relevantes sobre o nosso tema é do Mehmood et al. (2019) onde exploraram estratégias de escalonamento para DSSCs com eletrólitos poliméricos.

A análise das citações locais identificou os periódicos mais influentes dentro do corpus de 422 documentos analisados (Figura 7). O *Journal of Physical Chemistry C* lidera com 943 citações, seguido pelo *Journal of the American Chemical Society* (892 citações) e *Journal of Materials Chemistry A* (618 citações).

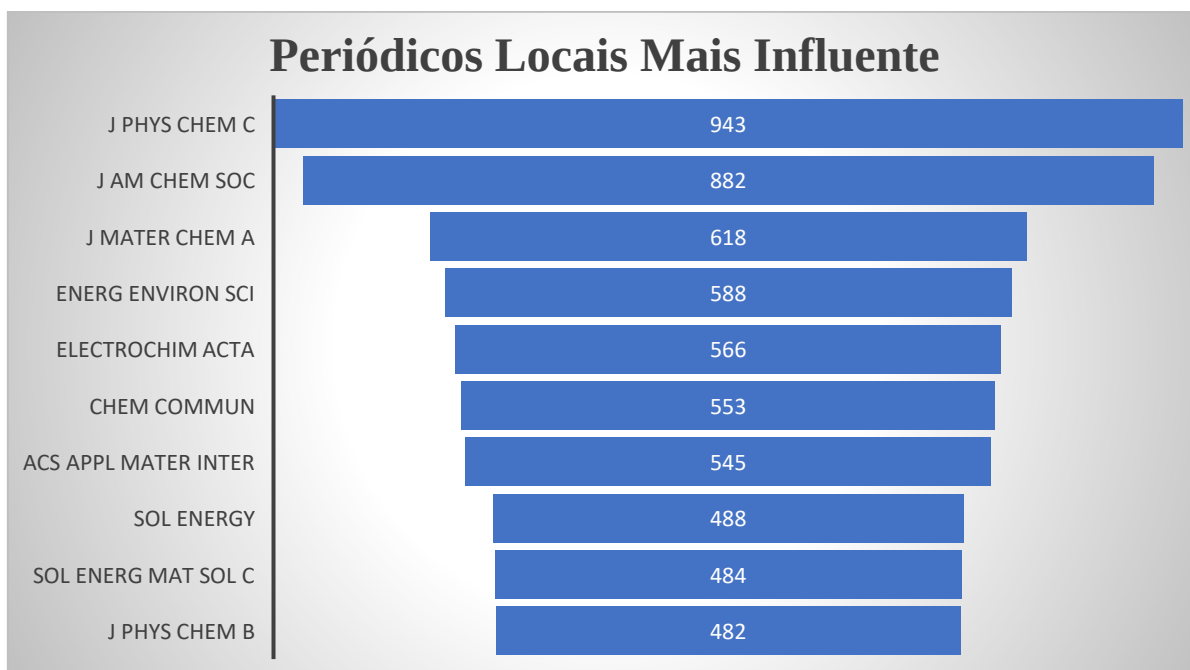


Figura 7. Fontes mais citadas localmente em pesquisas sobre células solares sensibilizadas por corante (2014–2024). Número de citações locais por periódico no período de 2014 a 2024. Fonte: Próprio Autor (2025).

A fonte *Journal of Physical Chemistry C* tem a sua dominância explicada por sua ênfase em mecanismos físico-químicos críticos para CSSCs, como transferência de carga e propriedades eletrônicas de materiais. Hagfeldt et al. (2020) publicaram um estudo seminal neste periódico sobre eletrólitos sólidos à base de spiro-OMeTAD, amplamente citado em pesquisas sobre estabilidade. A combinação de inovação técnica, relevância para desafios críticos (estabilidade, escalonamento) e a reputação do autor explica a alta citabilidade deste trabalho. Sua influência é refletida no seu corpus bibliométrico, onde é frequentemente citado como marco na transição de DSSCs líquidas para sólidas.

Outra fonte com número de citações altas é o *Journal of the American Chemical* que publica pesquisas inovadoras em síntese de corantes e fotossensibilizadores. O trabalho de Grätzel et al. (2015) sobre corantes de porfirina com eficiência de 13% tornou-se referência para estudos de alta performance.

A figura abaixo (Figura 8), gerada pelo VOSviewer apresenta uma análise de coautoria entre diferentes instituições acadêmicas e de pesquisa no contexto das células solares sensibilizadas por corantes (DSSCs).

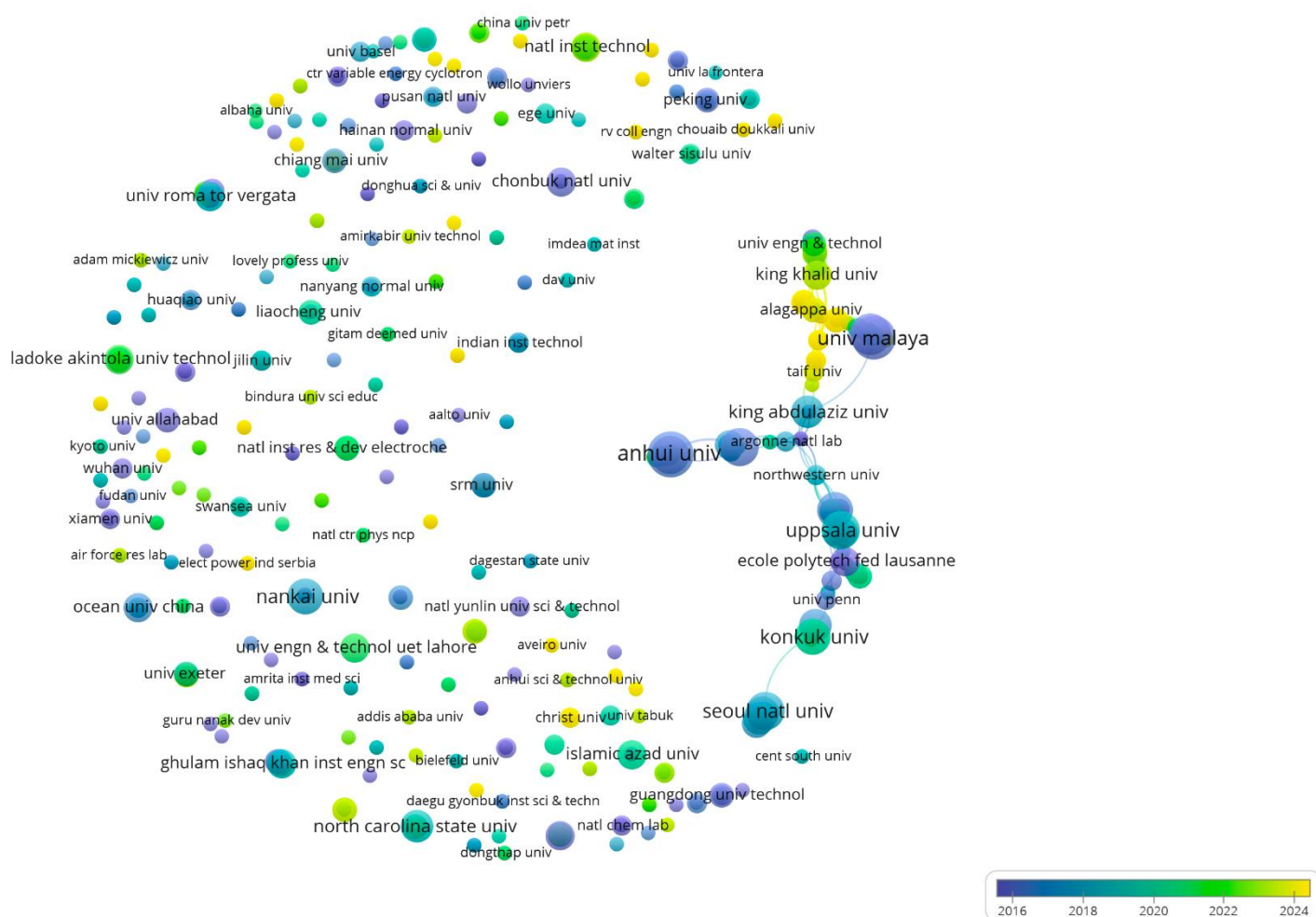


Figura 8. Redes de colaboração entre instituições em pesquisas sobre DSSCs (2014–2024). *Mapa de colaborações institucionais, destacando universidades líderes e clusters regionais.* Fonte: Próprio Autor (2025).

O cluster que mais chama atenção e talvez o mais importante nesse tópico é o da *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, liderada por *Michael Grätzel*, destaca-se como o centro de pesquisa mais influente na área de DSSCs. Suas colaborações envolvem o desenvolvimento de novos eletrólitos sólidos e a aplicação de perovskitas como fotossensibilizadores, resultando em avanços significativos na eficiência desses dispositivos.

A *Uppsala University*, sob a liderança de *Anders Hagfeldt*, mantém uma parceria frequente com a EPFL. Seus estudos concentram-se nos mecanismos de transporte de carga e na estabilidade de DSSCs, contribuindo para a otimização dos dispositivos. Estas duas fontes publicaram juntas 18 artigos sobre eletrólitos sólidos, incluindo o estudo "*Solid-State DSSCs: From Materials to Commercial Viability*" (2019).

Um dos trabalhos mais influentes dessa cooperação foi o artigo "*Molecular*

Photovoltaics”, no qual os pesquisadores revisam os princípios fundamentais das DSSCs e discutem melhorias em eficiência e durabilidade (Hagfeldt; Grätzel, 2000).

3.1.3 Documentos

A análise bibliométrica realizada revelou os documentos mais citados globalmente na área de células solares sensibilizadas por corantes (DSSCs), evidenciando os principais estudos que influenciaram o desenvolvimento desse campo de pesquisa. Os dados foram extraídos e organizados com base no total de citações, na média anual de citações (*TC per Year*) e no número de citações normalizadas (*Normalized TC*), permitindo identificar os trabalhos mais relevantes e com maior impacto acadêmico. A Tabela 4 apresenta os artigos mais citados sobre DSSCs no período de 2014 a 2024, considerando três principais métricas: número total de citações, citações por ano e citações normalizadas.

A métrica *total citations* representa o impacto absoluto do artigo na comunidade científica. O artigo de Yang et al. (2016), publicado no *Journal of Materials Chemistry A*, liderando com 492 citações, tornou-se uma referência fundamental em células solares de perovskita (PSCs) devido a sua abordagem abrangente e atualizada sobre camadas de transporte de elétrons (ETLs), um componente crítico para a eficiência e estabilidade dessas células. Em seguida temos Seo et al. (2016) e Xie et al. (2015), ambos com mais de 300 citações.

Tabela 4. Principais documentos citados sobre DSSC (2014-2024)

(continua)

Paper	Title	Total Citations	TC per Year	Normalized TC
YANG G, 2016, J MATER CHEM A	Recent progress in electron transport layers for efficient perovskite solar cells	492	49,20	9,32
SEO J, 2016, ACCOUNTS CHEM RES	Rational Strategies for Efficient Perovskite Solar Cells	310	31,00	5,87
XIE Y, 2015, J AM CHEM SOC	Porphyrin Cosensitization for a Photovoltaic Efficiency of 11.5%: A Record for Non-Ruthenium Solar Cells Based on Iodine Electrolyte	309	28,09	7,80
CALOGERO G, 2015, CHEM SOC REV	Vegetable-based dye-sensitized solar cells	288	26,18	7,27
JUAREZ-PEREZ EJ, 2016, CHEM MAT	Role of the Dopants on the Morphological and Transport Properties of Spiro-MeOTAD Hole Transport Layer	209	20,90	3,96
PAN JH, 2014, ADV FUNCT MATER	Large-scale Synthesis of Urchin-like Mesoporous TiO ₂ Hollow Spheres by Targeted Etching and Their Photoelectrochemical Properties	203	16,92	4,05

Tabela 4. Principais documentos citados sobre DSSC (2014-2024)

(conclusão)

Paper	Title	Total Citations	TC per Year	Normalized TC
XU P, 2017, NANO TODAY	Water splitting dye-sensitized solar cells	168	18,67	4,50
SULLIVAN I, 2016, CHEM MAT	Copper(I)-Based p-Type Oxides for Photoelectrochemical and Photovoltaic Solar Energy Conversion	163	16,30	3,09
MOZAFFARI S, 2017, RENEW SUST ENERG REV	An overview of the Challenges in the commercialization of dye sensitized solar cells	147	16,33	3,94
SONG H, 2018, CHEM COMMUN	Porphyrin-sensitized solar cells: systematic molecular optimization, coadsorption and cosensitization	144	18,00	6,55

Fonte: Próprio Autor (2025)

Esses números indicam que tais estudos são amplamente utilizados como referência por pesquisadores da área. Citações por ano (*TC per Year*) permite avaliar a popularidade de um artigo ao longo do tempo, independentemente do ano de publicação. O artigo de Yang et al. (2016) apresenta a maior taxa, com 49,2 citações por ano, indicando um impacto científico constante.

Outros estudos, como os de Seo et al. (2016) e Pan et al. (2014), também apresentam valores elevados, demonstrando relevância científica sustentada. Citações normalizadas (*Normalized TC*) ajusta o número de citações considerando diferenças temporais e tendências gerais da literatura científica. O artigo de Yang et al. (2016) também lidera nesta categoria (9,32), seguido por Xie et al. (2015) com 7,80. Esse dado é crucial para identificar artigos que continuam influentes mesmo com o avanço das pesquisas.

A Figura 9 apresenta a rede de acoplamento bibliográfico dos principais artigos sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSCs) no período de 2014 a 2024.

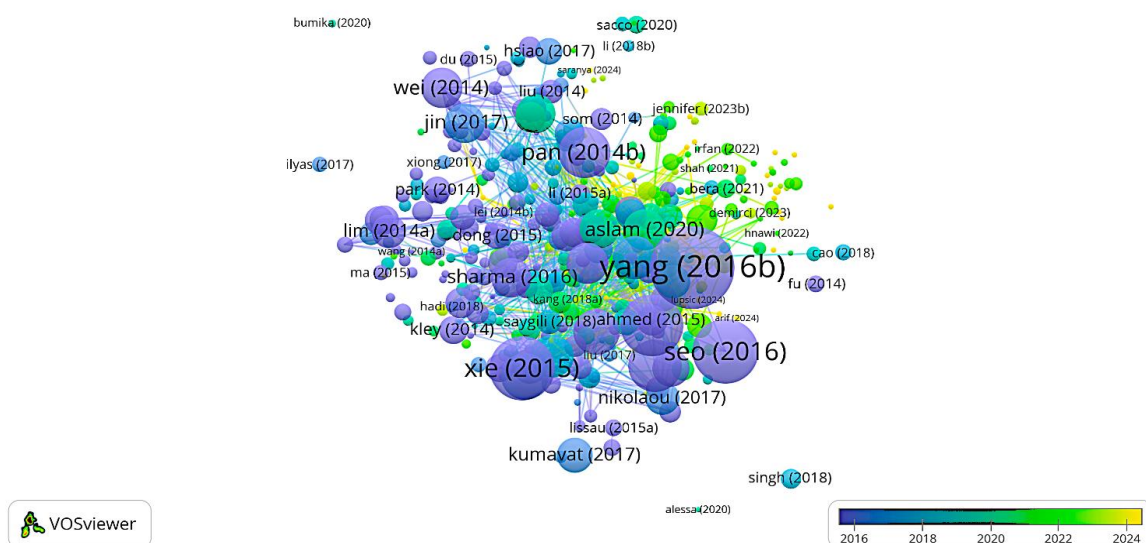


Figura 9. Rede de Acoplamento Bibliográfico dos Principais Estudos sobre DSSC (2014-2024). O artigo Yang (2016) aparece como um dos principais nós, evidenciando sua influência contínua na pesquisa sobre camadas de transporte de elétrons em células solares. Fonte: Próprio Autor (2025).

O estudo de Yang (2016), intitulado *"Recent progress in electron transport layers for efficient perovskite solar cells"*, destaca-se como um dos mais citados na área, acumulando 492 citações nesse intervalo de tempo. A análise visual da rede indica que Yang (2016) ocupa uma posição central, possuindo numerosas conexões com outros estudos influentes, assim como Seo (2016) e Xie (2015). O tamanho do nó representa a quantidade de citações recebidas, evidenciando a importância do artigo na construção do conhecimento sobre DSSC.

A coloração dos nós na rede segue a escala de tempo apresentada na legenda, onde os tons mais escuros (azul e roxo) representam artigos publicados antes de 2016, enquanto as cores mais claras (verde e amarelo) indicam estudos recentes, de 2022 a 2024. Essa distribuição temporal evidencia que o trabalho de Yang (2016) continua sendo amplamente referenciado, influenciando pesquisas atuais.

3.1.4 Países

A colaboração científica entre países desempenha um papel essencial no avanço do conhecimento sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSCs). No período de 2014 a 2016, observa-se uma distribuição desigual na produção de artigos científicos sobre o tema. A China lidera com 339 publicações, seguida pela Índia (294), Coreia do Sul (138), Estados Unidos (119), Malásia (62), Itália (59), Paquistão (55), Arábia Saudita (49), Japão (39) e Reino Unido (37). Esses dados evidenciam a predominância de países asiáticos na pesquisa sobre DSSC, especialmente a China e a Índia, que juntas representam uma parcela significativa da produção acadêmica global.

Estudos mostram que a China lidera a produção científica sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSC) devido a investimentos governamentais, infraestrutura de pesquisa avançada e colaborações internacionais. O país implementou políticas robustas de incentivo à pesquisa em energia renovável, resultando em amplo financiamento para universidades e centros de inovação (Li et al., 2020). Além disso, pesquisadores chineses têm obtido recordes em eficiência de células solares, como a célula orgânica de junção única com 20% de eficiência (Wang et al., 2024) e a tandem perovskita-orgânica com 26,4% (Zhang et al., 2024).

A Figura 10 apresenta a rede de acoplamento bibliográfico entre países, ilustrando as conexões estabelecidas com base em referências compartilhadas.

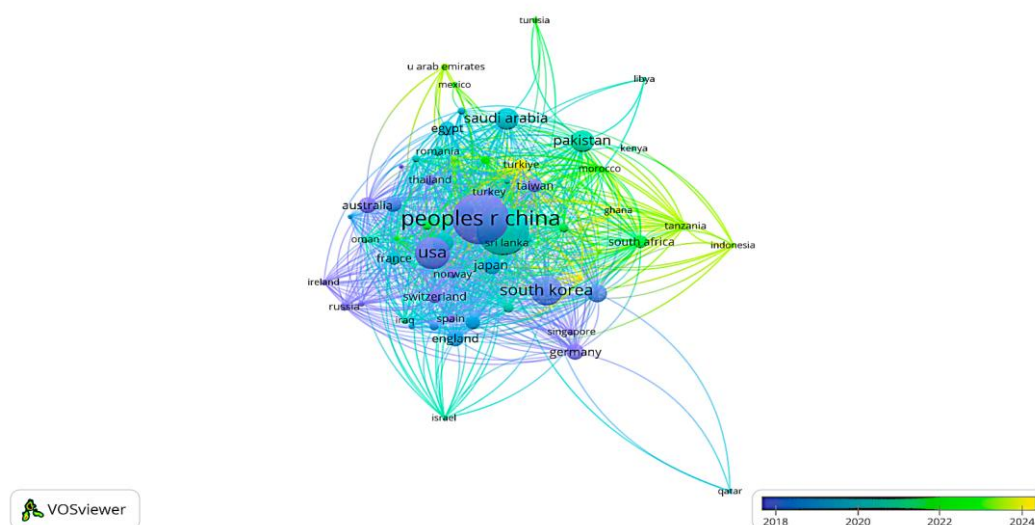


Figura 10. Acoplamento Bibliográfico entre Países na Pesquisa sobre DSSC
 Legenda: Representação da rede de acoplamento bibliográfico entre países no campo das DSSC. A coloração segue uma escala temporal de 2018 a 2024, destacando a evolução das colaborações científicas ao longo dos anos. Fonte: Próprio Autor (2025).

O tamanho do nó representa a quantidade de publicações de cada país, enquanto as linhas indicam a força das conexões bibliográficas. A China aparece como o país mais central na rede, refletindo sua alta produção científica e colaboração internacional. Os Estados Unidos, Coreia do Sul e Alemanha também desempenham papéis importantes na conectividade entre diferentes nações.

3.1.5 Tendências Temáticas

A análise de palavras-chave é fundamental para identificar tendências de pesquisa dentro deste tópico. A análise bibliométrica das publicações sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSC) entre 2014 e 2024, apresentada pela figura 11, revela um foco crescente em aspectos relacionados ao desempenho ("performance", 117 ocorrências) e à eficiência ("efficiency", 97 ocorrências) dos dispositivos. Isso reflete a busca contínua por otimização na conversão de energia, um dos principais desafios no desenvolvimento dessas células solares (Liu et al., 2021).

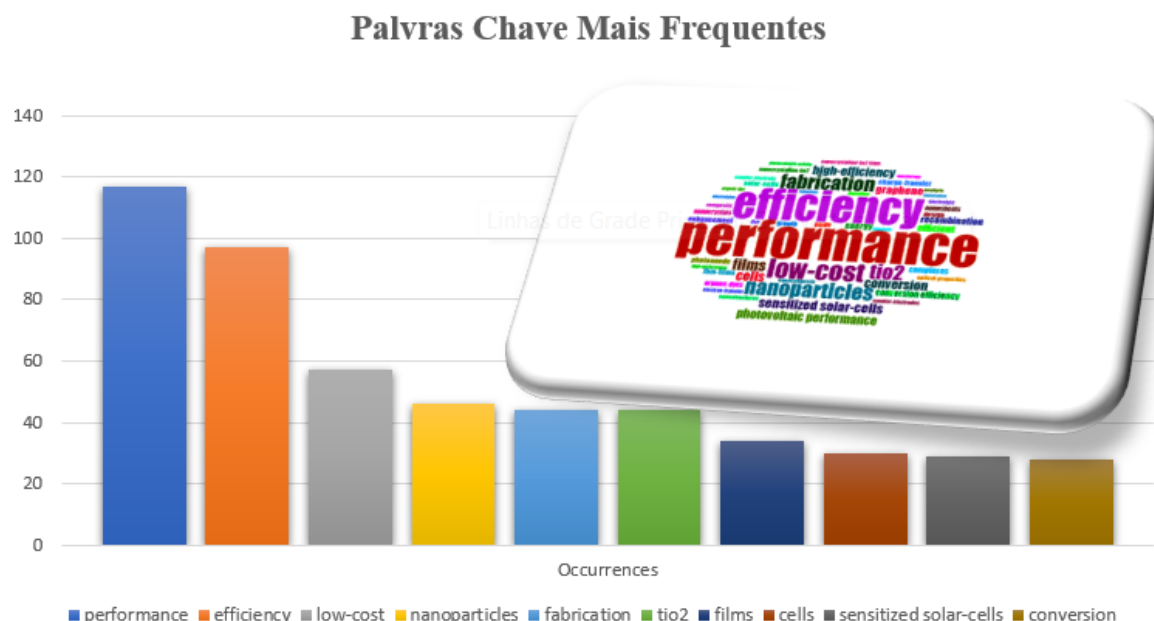


Figura 11. Análise das tendências temáticas em DSSCs (2014-2024). Gráfico de frequência de palavras-chave e nuvem de palavras representando os temas mais recorrentes na pesquisa sobre células solares sensibilizadas por corante (DSSC) no período de 2014 a 2024. Fonte: Próprio Autor (2025).

A partir da figura acima podemos observar um outro aspecto recorrente na literatura, o custo reduzido ("low-cost", 57 ocorrências), indicando um direcionamento para materiais e processos de fabricação mais acessíveis (Zhang et al., 2020). Os avanços no uso de nanopartículas (46 ocorrências) e filmes finos ("films", 34 ocorrências) demonstram a importância das nanociências na melhoria da estabilidade e do desempenho das DSSCs (Ahmed et al., 2019).

Outro ponto relevante é a recorrência do dióxido de titânio ("tio2"), material amplamente utilizado como camada de transporte de elétrons, cuja modificação estrutural vem sendo explorada para melhorar a eficiência e a estabilidade dos dispositivos (Kim et al., 2018). A nuvem de palavras também destaca expressões como "graphene" e "recombination", sugerindo que os estudos recentes investigam formas de mitigar a recombinação de cargas e melhorar a condução elétrica por meio de novos materiais (Rao et al., 2022).

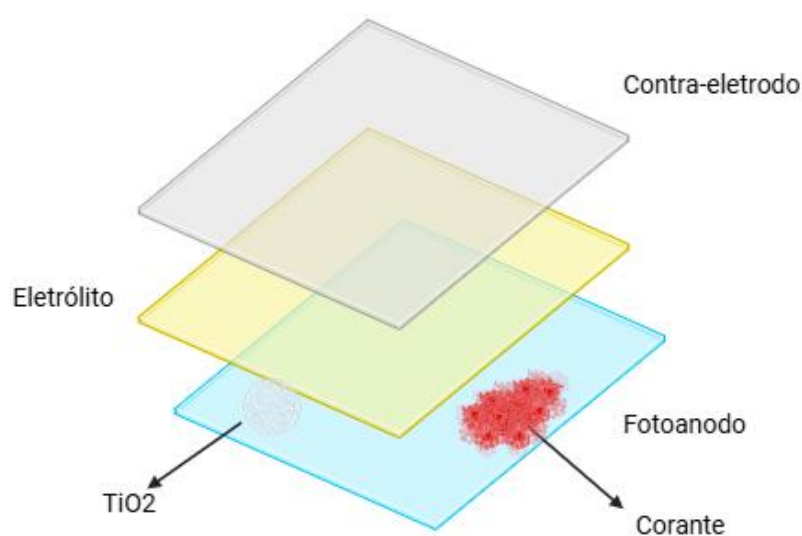
4. PRINCÍPIOS E ESTRUTURAS DAS DSSCS

As Células Solares Sensibilizadas por Corante (DSSCs) emergiram como uma alternativa promissora às células solares tradicionais, oferecendo vantagens como baixo custo de produção e flexibilidade na fabricação. Essas células fotovoltaicas operam com base em um

mecanismo de conversão fotovoltaica distinto, que envolve a absorção de luz, transferência de elétrons e regeneração do corante (Gratzel, 2003).

4.1 Mecanismo de funcionamento das DSSCs

O princípio de funcionamento das DSSCs (Figura 12) baseia-se na absorção de luz pelo corante sensibilizador, seguida pela injeção de elétrons no óxido semiconductor e pela subsequente regeneração do corante pelo eletrólito. Inicialmente, a incidência de luz promove a excitação dos elétrons do corante, levando-os ao estado excitado. Esses elétrons são, então, transferidos para a banda de condução do semiconductor, geralmente TiO_2 , e seguem para o circuito externo, gerando corrente elétrica. O corante oxidado é regenerado pelo eletrólito, que por sua vez transfere elétrons ao contraeletrodo, fechando o ciclo eletroquímico (Grätzel, 2003).



Created in BioRender.com 

Figura 12. Diagrama esquemático de uma célula solar sensibilizada por corante (DSSC) com destaque para seus principais componentes. *Representação simplificada de uma célula de Grätzel (DSSC), ilustrando sua estrutura básica e mecanismo de funcionamento.* Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2 Principais Componentes das DSSCs e Tecnologias Emergentes

4.2.1 Óxido Semicondutor

O óxido semicondutor desempenha um papel crucial tanto na adsorção de corantes quanto no transporte de elétrons na DSSC. O TiO_2 é amplamente utilizado devido à sua alta área superficial, estabilidade química e adequado alinhamento de bandas ($\approx 3,2$ eV), garantindo excelente compatibilidade com corantes (Hagfeldt et al., 2010).

Estudo por Lee et al. (2016) investigaram a otimização de nanoestruturas de TiO_2 , demonstrando que filmes mesoporosos aumentam a adsorção de corante e reduzem a recombinação de elétrons. Os autores relataram eficiências de conversão de até 11,2% com o uso de TiO_2 funcionalizado com grafeno, destacando a importância da engenharia de superfície.

O óxido de zinco (ZnO) apresenta mobilidade eletrônica 10 vezes maior que o TiO_2 , mas sua instabilidade em meio ácido limita aplicações. Em uma pesquisa feita por Zhang et al. (2019) propuseram nanocompósitos de ZnO/TiO_2 para combinar as vantagens de ambos os materiais. O estudo mostrou que a adição de TiO_2 estabiliza a estrutura de ZnO , resultando em eficiência de 9,8%.

Outro óxido semicondutor é o dióxido de estanho (SnO_2) que possui banda proibida mais larga ($\sim 3,6$ eV), sendo adequado para absorção UV. Pesquisa feita por Kim et al. (2018) desenvolveram DSSCs com SnO_2 nano-estruturado e observaram eficiência de 7,5%, inferior ao TiO_2 , mas com estabilidade térmica superior. A adição de grafeno ao SnO_2 melhorou a condutividade, reduzindo perdas por recombinação (Kim et al., 2018).

Novos óxidos semicondutores têm surgido em pesquisas. De acordo com a pesquisa feita por Wang et al. (2020), o pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) tem ganhado atenção devido à sua baixa recombinação interfacial. Os pesquisadores reportaram DSSCs com Nb_2O_5 mesoporoso, atingindo eficiência de 8,9%. O material mostrou excelente estabilidade após 1000 horas de operação, atribuída à sua estrutura cristalina estável.

Outra pesquisa por Gupta et al. (2021) mostrou que o trióxido de tungstênio (WO_3) possui banda proibida ajustável ($\sim 2,6$ - $2,8$ eV), permitindo absorção na região visível. Os pesquisadores sintetizaram nanofios de WO_3 modificados com pontos quânticos de carbono - nanopartículas semicondutoras com tamanho entre 2-10 nm que apresentam propriedades eletrônicas únicas devido aos efeitos de confinamento quântico. Essa combinação alcançou eficiência de 10,1%, demonstrando uma sinergia entre:

- A ampla absorção de luz do WO_3 no espectro visível;

- A alta condutividade elétrica dos pontos quânticos, que facilitam o transporte de cargas;
- A grande área superficial dos nanofios, que aumenta a interface ativa para conversão de energia.

4.2.2 Sensitizador

As células solares sensibilizadas por corante (DSSCs) utilizam moléculas sensibilizadoras para absorver a luz e iniciar a conversão fotovoltaica, transferindo elétrons excitados para o semicondutor, geralmente TiO_2 (Matthew *et al.*, 2014).

Os corantes organometálicos foram os primeiros a demonstrar alta eficiência em DSSCs, sendo os complexos de rutênio (Ru) os mais amplamente investigados. Esses corantes apresentam ampla absorção espectral e excelente estabilidade eletroquímica. Grätzel *et al.* (1991) foram pioneiros no desenvolvimento desses corantes, introduzindo o complexo $\text{cis-[RuL}_2(\text{NCS})_2]$ ($\text{L} = 2,2'$ -bipiridina-4,4'-dicarboxilato), conhecido como N3, que atingiu eficiências próximas de 11% sob iluminação padrão (AM 1.5). Posteriormente, variantes como N719 e Z907 foram desenvolvidas para melhorar a solubilidade e estabilidade térmica dos corantes (Hagfeldt *et al.*, 2010).

Apesar do alto desempenho, o uso de metais de transição como rutênio, ósmio e irídio apresenta desafios relacionados ao custo e à toxicidade, o que motivou pesquisas em busca de alternativas mais sustentáveis. Estudos recentes têm explorado a modificação estrutural desses complexos, incorporando ligantes π -conjugados para melhorar a absorção na região do visível e aumentar a eficiência de conversão (Kakiage *et al.*, 2015). Para co-sensibilizar uma DSSC, Hore *et al.* produziram um corante integrando corantes convencionais à base de anilina A1-4 com um corante N3. A estrutura doadora nesses co-sensibilizadores é um anel de N, N-dimetilanilina, que está ligado a funções de retirada de elétrons, como ácido barbitúrico (A1), ácido N, N-dimetil barbitúrico (A2), ácido tiobarbitúrico (A3) e ácido N, N-dietil tiobarbitúrico (A4). Eles criaram um painel solar com um PCE de 7,02%.

Os corantes orgânicos sem metal surgiram como uma alternativa promissora aos complexos de rutênio devido ao seu menor custo, alta flexibilidade sintética e maior compatibilidade ambiental. Esses corantes geralmente apresentam uma estrutura doadora-aceptora (D- π -A), onde o fragmento doador é frequentemente baseado em aminas aromáticas (como difenilamina, indolina e trifenilamina), enquanto o grupo aceptor costuma ser um ácido carboxílico ou cianoacrílico (Ooyama; Harima, 2012).

Tsai et al. (2021) sintetizaram novos corantes baseados em antraceno e observaram eficiências superiores a 27% sob iluminação interna. Outra abordagem relevante foi apresentada por Freitag et al. (2021), que combinaram sensibilizadores orgânicos com mediadores redox baseados em cobre, resultando em valores de tensão de circuito aberto superiores a 1 V e eficiências próximas de 29%. A modificação estrutural dos corantes orgânicos, incluindo a adição de cadeias alquiladas e grupos π -extensores, tem sido uma estratégia eficiente para otimizar a absorção espectral e melhorar a estabilidade dos dispositivos (Mathew et al., 2014).

Os corantes naturais têm atraído atenção devido à sua sustentabilidade e facilidade de extração a partir de fontes vegetais. Esses sensibilizadores incluem derivados de clorofila, flavonoides e carotenoides. Estudos demonstraram que extratos de hibisco, amoras e espinafre apresentam bom desempenho como sensibilizadores em DSSCs (Calogero; Marco, 2008).

No entanto, um dos desafios desses corantes é sua estabilidade limitada sob exposição prolongada à luz e sua baixa absorção na região do infravermelho próximo. Para mitigar esses problemas, estudos recentes têm focado na modificação química dos pigmentos naturais e na introdução de grupos funcionais para melhorar sua ancoragem ao semicondutor (Zhou et al., 2020). Apesar das limitações, os corantes naturais permanecem uma opção viável para aplicações de baixo custo e dispositivos de uso descartável.

Os corantes mordentes, tradicionalmente utilizados na indústria têxtil, também foram investigados como sensibilizadores para DSSCs. Esses corantes, como ácido tânico e alumínio-cromo, apresentam afinidade com óxidos metálicos e podem atuar como pontes eficientes para a transferência de elétrons. Embora menos explorados do que outras classes de corantes, pesquisas indicam que sua estabilidade química e capacidade de formar complexos robustos podem contribuir para a durabilidade das células solares. No entanto, sua eficiência de conversão ainda é relativamente baixa em comparação com os corantes organometálicos e orgânicos modificados. (Zakeeruddin; Grätzel, 2005)

Os corantes baseados em pontos quânticos (CdX, X = S, Se, Te) apresentam propriedades ópticas únicas devido ao efeito de confinamento quântico. Esses materiais possuem banda proibida ajustável, o que permite sua sintonização para otimizar a absorção espectral em DSSCs (Lee et al., 2013).

Estudos de Shao et al., (2021) indicam que DSSCs baseadas em pontos quânticos podem atingir eficiências superiores a 12%, dependendo da escolha do material e da passivação da superfície do semicondutor. No entanto, a toxicidade associada ao uso de cádmio ainda é uma preocupação significativa, levando à exploração de alternativas baseadas em sulfetos de

chumbo e materiais livres de metais pesados.

As perovskitas emergiram como uma das tecnologias mais promissoras para conversão fotovoltaica. Corantes baseados em perovskitas, como $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$), demonstraram eficiências impressionantes em DSSCs, com valores superiores a 25% (Jeon et al., 2015). A capacidade desses materiais de absorver amplamente a luz visível e sua excelente mobilidade de carga os tornaram um dos principais focos de pesquisa na última década.

Entretanto, desafios como estabilidade térmica e degradação em ambientes úmidos ainda precisam ser superados para viabilizar sua aplicação comercial em larga escala. Alternativas como perovskitas livres de chumbo estão sendo exploradas para mitigar problemas ambientais associados ao uso de metais pesados (Snaith, 2018).

A Figura 13 ilustra um resumo dos corantes utilizados em DSSCs.

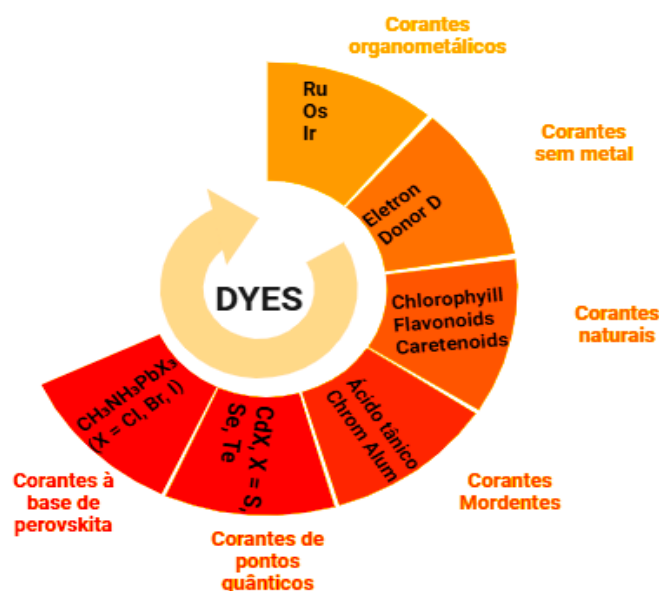


Figura 13. Diagrama esquemático de vários corantes usados em DSSC. Um diagrama circular hierárquico que ilustra oito categorias principais de corantes aplicados em DSSCs. Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.3 Eletrólito

Os eletrólitos são componentes essenciais nas células solares sensibilizadas por corantes (DSSC), pois facilitam o transporte de cargas e a regeneração do corante oxidado (Grätzel, 1991). A eficiência e estabilidade das DSSCs são fortemente influenciadas pela formulação do eletrólito, incluindo a seleção do mediador redox, solventes e aditivos (Devadiga et al., 2021).

Os eletrólitos líquidos são os mais utilizados devido à sua alta condutividade iônica e boa compatibilidade com os materiais da DSSC. O par redox iodeto/tri-iodeto (I^-/I_3^-) é o mais

comum, proporcionando boa estabilidade e eficiência (Venkatesan et al., 2021). Contudo, a evaporação do solvente e o vazamento do eletrólito são desafios significativos para a estabilidade de longo prazo.

Para superar essas limitações, estudos recentes têm explorado solventes alternativos, como 3-metoxipropionitrila, que reduz a volatilidade e melhora a estabilidade térmica (Venkatesan et al., 2021). Em um estudo comparativo, DSSCs contendo um eletrólito com solvente de 3-metoxipropionitrila demonstraram eficiência de conversão de energia de 24,52% sob iluminação interna (607,8 luxes), enquanto as DSSCs convencionais apresentaram menor desempenho sob as mesmas condições.

Para mitigar os problemas associados aos eletrólitos líquidos, alternativas em estado sólido ou em gel foram desenvolvidas. Eletrólitos poliméricos, como os baseados em polietileno óxido (PEO) e poli (metacrilato de metila) (PMMA), têm sido propostos como alternativas promissoras devido à sua capacidade de reduzir a evaporação do solvente e melhorar a estabilidade mecânica (Liu et al., 2021). Estudos indicam que DSSCs utilizando eletrólitos baseados em PEO apresentam eficiências superiores a 21% sob iluminação interna de 200 lux (Liu et al., 2021).

Outro avanço significativo foi relatado por Tsai et al. (2018), que desenvolveram um eletrólito em gel polimérico contendo óxidos metálicos, resultando em eficiência de conversão de 20,11% sob iluminação de 200 lux. Esses eletrólitos apresentaram menor resistência de transferência de carga e maior estabilidade térmica.

A substituição do sistema redox iodeto/tri-iodeto tem sido investigada devido às perdas de voltagem e corrosividade do iodo. Mediadores redox baseados em cobalto ($\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$) demonstraram eficiências superiores, especialmente sob iluminação interna (Tanaka et al., 2020). Por exemplo, um estudo comparativo mostrou que DSSCs contendo eletrólitos de cobalto atingiram eficiências de até 29,2% sob iluminação de 1000 lux, comparado às DSSCs convencionais com sistema iodeto/tri-iodeto, que apresentaram eficiência máxima de 20% (Tanaka et al., 2020).

4.2.4 *Contra-eletrodo*

O contra-eletrodo (CE) é um componente essencial das células solares sensibilizadas por corantes (DSSC), sendo responsável por facilitar a redução do mediador redox no eletrólito e garantir a continuidade do circuito elétrico. Tradicionalmente, a platina (Pt) é utilizado como material de CE devido à sua alta condutividade e excelente atividade catalítica (Grätzel, 1991).

No entanto, o alto custo e a escassez da platina incentivaram pesquisas para encontrar materiais alternativos com desempenho comparável (Huang et al., 2020).

Materiais carbonosos, como nanotubos de carbono (CNTs), grafeno e aerogéis de carbono, têm sido amplamente estudados devido à sua alta condutividade elétrica, estabilidade química e custo reduzido (Huang et al., 2020). Estudos demonstraram que DSSCs com contra-eletrodos de aerogéis de carbono alcançaram eficiência de conversão de energia de 9,08% sob iluminação solar padrão (1 sun), e até 20,1% sob iluminação artificial de 7000 lux (Huang et al., 2020).

Outro estudo realizado por Sil et al. (2020) mostrou que DSSCs utilizando eletrodos de grafeno dopado alcançaram eficiências superiores a 20% sob iluminação interna de 6000 lux, sendo uma alternativa promissora para aplicações em dispositivos eletrônicos de baixo consumo.

Pesquisadores têm explorado compostos metálicos como dissulfeto de molibdênio (MoS_2), selenetos de cobalto (CoSe_2) e ligas metálicas como substitutos da platina. Huang et al. (2020) desenvolveram um contra-eletrodo baseado em $\text{CoSe}_2/\text{CoSeO}_3$ com estrutura hierárquica tipo "ouriço", alcançando eficiências de 9,29% sob iluminação de 1 sun, superando o desempenho de DSSCs com contra-eletrodos convencionais de platina (8,33%).

Além disso, Tsai et al. (2018) demonstraram que DSSCs utilizando eletrodos de MoS_2 alcançaram eficiências superiores a 20% sob iluminação interna, devido à sua excelente capacidade catalítica e estabilidade química.

Os polímeros condutores, como politiofeno e polianilina, têm sido investigados devido à sua flexibilidade, baixo custo e facilidade de deposição sobre substratos flexíveis. Liu et al. (2021) relataram que DSSCs com polímeros condutores dopados com nanotubos de carbono atingiram eficiências de até 18% sob iluminação interna de 1000 lux, mostrando um potencial significativo para aplicações portáteis.

5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS DSSCS

As células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) ainda enfrentam desafios que limitam sua ampla comercialização, no entanto, são uma alternativa promissora às tecnologias fotovoltaicas tradicionais devido ao seu baixo custo de produção, flexibilidade e capacidade de operar sob baixa iluminação. Entre suas principais vantagens, destaca-se o baixo custo de produção, pois diferentemente das células solares de silício, as DSSCs utilizam materiais mais acessíveis, como corantes naturais ou sintéticos e substratos de vidro condutor (Jabeen et al.,

2025). Além disso, seu processo de fabricação é mais simples e pode ser realizado a temperaturas mais baixas. Outra vantagem importante é a eficiência sob iluminação difusa, o que as torna ideais para aplicações internas e em regiões com climas nublados (Mahadik et al., 2024).

As DSSCs também se destacam pela flexibilidade e transparência, permitindo sua integração em janelas e dispositivos portáteis (Jabeen et al., 2025). Outro ponto relevante é a sustentabilidade ambiental, já que o uso de corantes naturais reduz o impacto ambiental e possibilita a produção de DSSCs mais sustentáveis, sem metais raros ou processos altamente poluentes (Mahadik et al., 2024).

Entretanto, apesar de sua relevância, as DSSCs apresentam algumas desvantagens, como a baixa eficiência em comparação às células de silício, especialmente devido às perdas de energia nos processos de transferência de carga e recombinação de elétrons (Jabeen et al., 2025). A estabilidade limitada é outro desafio significativo, pois os corantes orgânicos e naturais tendem a se degradar com o tempo, afetando a longevidade das DSSCs. Além disso, eletrólitos líquidos podem evaporar, comprometendo a estabilidade do dispositivo (Mahadik et al., 2024). A baixa eficiência de conversão em larga escala também é um obstáculo, pois a transição de DSSCs de pequena escala para módulos maiores apresenta desafios como o aumento da resistência série e a redução do fator de preenchimento, impactando a eficiência final (Jabeen et al., 2025).

No que se refere aos componentes das DSSCs, o fotoanodo apresenta vantagens como a grande área superficial para adsorção do corante e o uso de materiais abundantes como TiO_2 e ZnO . No entanto, pode sofrer recombinação eletrônica e requer processos de sinterização a altas temperaturas (Mahadik et al., 2024). O corante tem alta capacidade de absorção de luz, sendo os corantes naturais sustentáveis e econômicos, mas com baixa estabilidade e eficiência. Já os corantes à base de rutênio, embora mais eficientes, são caros e tóxicos (Jabeen et al., 2025).

O eletrólito facilita a regeneração do corante e o transporte de carga, mas os eletrólitos líquidos podem evaporar e os eletrólitos sólidos apresentam menor condutividade iônica (Mahadik et al., 2024). O contra-eletrodo, por sua vez, pode ser fabricado com materiais alternativos de baixo custo, como carbono e polímeros condutores. No entanto, a platina, que é o material padrão, é cara e escassa, e alguns materiais apresentam baixa atividade catalítica (Jabeen et al., 2025).

6. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E COMERCIALIZAÇÃO DAS DSSCS

As células solares sensibilizadas por corantes (DSSCs) emergiram como uma alternativa promissora às células solares convencionais de silício devido ao seu baixo custo de produção, flexibilidade de aplicação e capacidade de operação eficiente sob baixa iluminação. No entanto, a transição dessas células do ambiente laboratorial para o mercado apresenta desafios consideráveis (Hagfeldt *et al.*, 2010).

As oportunidades de investimento em DSSCs cresceram nos últimos anos, impulsionadas pela crescente demanda por soluções de energia sustentável. Empresas e instituições de pesquisa estão explorando o potencial das DSSCs em sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios (BIPV), em que sua transparência e flexibilidade permitem a integração perfeita em janelas e fachadas (Park *et al.*, 2024).

As DSSCs também se mostraram promissoras na alimentação de dispositivos de baixo consumo de energia, como sensores de IoT e eletrônicos vestíveis, beneficiando-se de sua capacidade de gerar eletricidade em condições de iluminação interna (Chen *et al.*, 2024). Os governos e os investidores privados também reconheceram o potencial das DSSCs, financiando projetos de pesquisa com o objetivo de reduzir os custos de produção e melhorar a escalabilidade. As políticas que promovem a energia limpa e a neutralidade de carbono estão incentivando ainda mais os investimentos na tecnologia DSSC (Yang *et al.*, 2023).

As DSSCs ganharam popularidade em aplicações de pequena escala, como eletrônicos portáteis e integração em edifícios, devido à sua transparência e capacidade de operar sob iluminação difusa. Empresas como Soloronix, Dyesol e G24 Power Limited investiram no desenvolvimento de DSSCs comerciais, explorando soluções para aumentar sua eficiência e estabilidade a longo prazo (Sekaran; Marimuthu, 2024). Contudo, a baixa eficiência de conversão energética e a degradação dos materiais são entraves para uma adoção em larga escala.

A eficiência das DSSCs é inferior à das células solares de silício convencionais, especialmente em aplicações externas. Para que as DSSCs possam competir no mercado de energia solar, a eficiência deve atingir pelo menos 10-12% (Sekaran; Marimuthu, 2024).

A economia das DSSCs baseadas em antocianinas, por exemplo, apresenta desafios adicionais. Apesar da viabilidade econômica dos corantes naturais, sua estabilidade e eficiência são significativamente menores em comparação aos corantes sintéticos à base de rutênio. O custo do corante representa uma parcela substancial do custo total do módulo, sendo necessário otimizar formulações para aumentar a eficiência e reduzir os custos de produção (Calogero *et*

al., 2015). Além disso, o custo de fabricação das DSSCs ainda é elevado devido à necessidade de materiais especializados, como óxidos metálicos e eletrólitos avançados.

A transição das DSSCs do ambiente laboratorial para aplicações comerciais requer o desenvolvimento de estratégias para aumentar sua eficiência, estabilidade e viabilidade econômica. A eficiência das DSSCs comerciais ainda está abaixo dos requisitos para competição direta com outras tecnologias fotovoltaicas. A estabilidade dos materiais também é uma preocupação crítica, já que os eletrólitos líquidos podem evaporar e os corantes orgânicos podem degradar-se com o tempo. Para mitigar essas questões, avanços em eletrólitos sólidos e em gel, bem como a substituição de corantes naturais por compostos mais estáveis, estão sendo estudados, como exemplo pode-se citar as DSSCs utilizando eletrólitos baseados em cobalto demonstraram melhorias significativas na eficiência e na estabilidade (Tanaka et al., 2020).

A integração das DSSCs na arquitetura representa uma solução inovadora para edifícios sustentáveis, permitindo a geração de energia limpa diretamente de superfícies transparentes, como fachadas e janelas. Ao contrário dos painéis fotovoltaicos tradicionais de silício, que possuem uma aparência opaca e menos flexibilidade para aplicações arquitetônicas, as DSSCs permitem a passagem parcial da luz, tornando-as ideais para edifícios comerciais e residenciais que buscam reduzir o consumo energético sem comprometer a iluminação natural (Liu et al., 2019).

Estudos recentes apontam que a aplicação de DSSCs em janelas pode reduzir significativamente a demanda por eletricidade em edifícios comerciais, contribuindo para a eficiência energética urbana (Zhang et al., 2021). Além disso, o desenvolvimento de novas técnicas de deposição de camadas condutoras transparentes tem melhorado a durabilidade e a eficiência dessas células solares, aumentando sua viabilidade comercial (Park et al., 2022).

7. **Patentes**

Para investigar o estado da arte em patentes relacionadas às células solares sensibilizadas por corante (DSSC), realizou-se uma busca na base de dados *Espacenet*, plataforma de pesquisa de patentes do Escritório Europeu de Patentes (EPO). A estratégia de busca utilizou os seguintes critérios:

- Campos de busca: título, resumo ou reivindicações;
- Palavras-chave: "*Dye-sensitized solar cells*", "*solar energy*" e "*efficiency*";

- Período analisado: 2014-2024.

A consulta resultou em **93 patentes**, organizadas por relevância, destacando inovações relacionadas à composição de eletrólitos, métodos de fabricação e aprimoramento da eficiência das DSSCs. Dentre as patentes recuperadas, três se destacaram pela sua contribuição tecnológica filtradas pela sua relevância na base de dados.

1. Eletrólito para células solares sensibilizadas por corante (*KR20140105667A – Samsung SDI Co. Ltd*): esta patente descreve um eletrólito que melhora a eficiência de conversão de energia, a eficiência fotoconversora e a durabilidade das DSSCs. O eletrólito contém um derivado redox e uma mistura de solventes composta por um composto à base de nitrito e um composto à base de sulfóxido, em proporções variáveis.
2. Método de preparação de DSSC com alta eficiência de conversão fotoelétrica (*CN110265222A – Yiwu Ind & Commercial College*): propõe um método inovador para a fabricação de DSSCs, utilizando um material de melem para dopagem de um fotoanodo semiconductor. Isso ajusta a largura da banda de energia do semiconductor e amplia a capacidade de absorção da luz, resultando em uma separação de carga mais eficiente e um aumento significativo na eficiência de conversão fotoelétrica.
3. Método de fabricação de DSSC de estado sólido e dispositivo de preenchimento de eletrólito sólido (*US20143135648A1 – Korea Institute of Science & Technology*): apresenta um método de fabricação de DSSCs de estado sólido, com um dispositivo que permite um preenchimento mais uniforme do eletrólito sólido. Esse avanço melhora a eficiência da conversão de luz em energia, garantindo maior desempenho para as células solares sensibilizadas por corante.

7.1 Distribuição Geográfica

A análise da distribuição das patentes por país revela que a China domina amplamente o cenário de inovação em DSSCs, com o maior número de patentes depositadas no período analisado. A Coreia do Sul e os Estados Unidos aparecem em seguida, com contribuições significativas. Outros países, como Japão, França, Malásia e Rússia, possuem uma presença menor, indicando um foco mais restrito no desenvolvimento dessa tecnologia.

Essa tendência é consistente com os dados globais de depósitos de patentes, nos quais a China lidera com aproximadamente 1,58 milhão de pedidos em 2022, seguida pelos Estados

Unidos (505.539) e Coreia do Sul (272.315) (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL, 2023).

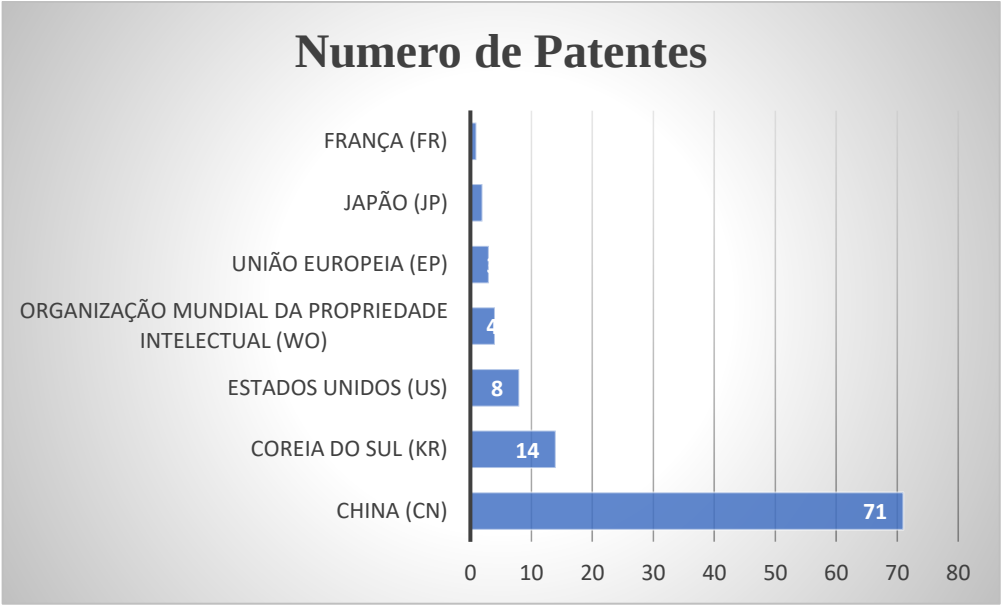


Figura 14. Distribuição de Patentes de DSSC por País (2014-2024). *Número de patentes publicadas relacionadas a células solares sensibilizadas por corante (DSSC) entre 2014 e 2024, organizadas por país de origem. Os dados foram obtidos a partir de uma busca no Espacenet. Fonte: Próprio Autor (2025).*

Essa distribuição geográfica evidencia o forte investimento da China em pesquisa e desenvolvimento de DSSCs, bem como a participação ativa de outros países asiáticos e dos Estados Unidos. Esse panorama pode refletir tanto a demanda do mercado quanto às políticas de incentivo à inovação em energia solar nesses países (Nunes, 2025)

A análise dessas patentes evidencia os avanços recentes no desenvolvimento das DSSCs, com foco na melhoria da eficiência energética, na durabilidade e na viabilidade industrial dessas tecnologias.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS DAS CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE (DSSCS)

As células solares sensibilizadas por corante (DSSCs) surgiram como uma tecnologia fotovoltaica promissora com potencial significativo para a geração de energia sustentável. Sua produção de baixo custo, sua capacidade de funcionar eficientemente em condições de iluminação difusa e interna e sua flexibilidade as tornam uma alternativa atraente às células solares convencionais baseadas em silício. Com a aceleração da transição global para a energia

renovável, espera-se que as DSSCs desempenhem um papel fundamental na promoção da sustentabilidade, do crescimento econômico e das oportunidades de investimento no setor de energia renovável (Almeida *et al.*, 2025).

A sustentabilidade das DSSCs está em seu uso de materiais ecologicamente corretos e métodos de produção com eficiência energética. Diferentemente da energia fotovoltaica baseada em silício, que exige processamento em alta temperatura e fabricação com uso intensivo de energia, as DSSCs podem ser fabricadas com materiais de baixo custo, como corantes naturais e sensibilizadores sem metal (Jabeen *et al.*, 2025).

Além disso, a integração de DSSCs em sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios (BIPV) e dispositivos eletrônicos portáteis oferece um caminho para soluções de energia verde que minimizam as pegadas de carbono. Sua capacidade de gerar eletricidade a partir de ambientes com pouca luz os torna adequados para ambientes urbanos onde os painéis solares tradicionais podem ser menos eficazes (Park *et al.*, 2024).

O investimento na tecnologia DSSC tem crescido constantemente, impulsionado pelo aumento do apoio governamental a projetos de energia renovável e pelo interesse do setor privado em soluções fotovoltaicas inovadoras. Com os avanços na ciência dos materiais e na integração do armazenamento de energia, as DSSCs estão se tornando mais viáveis para aplicações comerciais (Fazzio *et al.*, 2024).

Empresas e instituições de pesquisa estão se concentrando em melhorar a eficiência e a longevidade por meio de novos materiais sensibilizadores, eletrólitos de estado sólido e eletrodos nano-estruturados avançados (Li *et al.*, 2023). Essas inovações estão tornando as DSSCs cada vez mais competitivas em relação a outras tecnologias solares, atraindo investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento (Yang *et al.*, 2023).

O papel da pesquisa e desenvolvimento (P&D) na tecnologia DSSC é fundamental para seu sucesso futuro. Os avanços científicos já levaram a melhorias substanciais em termos de eficiência, estabilidade e escalabilidade. Estudos recentes sobre técnicas de co-sensibilização, que envolvem a combinação de vários corantes para aumentar a absorção de luz, demonstraram ganhos significativos de eficiência (Kim *et al.*, 2024). Além disso, o desenvolvimento de sistemas híbridos de perovskita-DSSC sem chumbo está abrindo novas possibilidades para dispositivos fotovoltaicos de alto desempenho (Zhang *et al.*, 2023).

Com esforços contínuos de P&D, as DSSCs têm o potencial de atingir níveis de eficiência que rivalizam com os painéis solares tradicionais, mantendo suas vantagens exclusivas de flexibilidade e custos de produção mais baixos. No contexto mais amplo da energia renovável, as DSSCs contribuem para a diversificação do mercado de energia solar.

Suas possíveis aplicações em cidades inteligentes, dispositivos IoT autoalimentados e eletrônicos vestíveis destacam sua versatilidade e adaptabilidade (Ely, 2013).

Ao integrar as DSSCs em projetos de produtos inovadores, as empresas podem oferecer soluções de energia sustentável que atendam às demandas dos mercados emergentes (Chen et al., 2024). Além disso, as políticas que promovem a neutralidade de carbono e o desenvolvimento de infraestrutura verde apoiam ainda mais o crescimento das aplicações baseadas em DSSCs, tornando-as um componente essencial dos futuros sistemas de energia (Yang et al., 2023).

9. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise abrangente sobre os avanços recentes em células solares sensibilizadas por corante (DSSCs), com base em uma abordagem combinada de revisão bibliométrica e revisão sistemática.

A análise bibliométrica revelou um cenário de transição no campo: enquanto a produção acadêmica anual apresentou declínio de 15,28%, possivelmente devido à saturação de abordagens convencionais e à ascensão de tecnologias concorrentes, como as células solares de perovskita.

Destacam-se como líderes mundiais em produção científica a China (46%), Índia (22%) e Coreia do Sul (11%), com redes de colaboração ainda pouco integradas entre continentes — apenas 12% das coautorias são transcontinentais. Instituições como a École Polytechnique Fédérale de Lausanne e a Universiti Putra Malaysia ocupam posições centrais nas redes de copublicações.

Em termos de inovações tecnológicas, o estudo identificou avanços importantes: (i) eletrólitos sólidos baseados em PEO, com eficiências superiores a 21% sob iluminação interna; (ii) corantes naturais, como os extraídos de *Curcuma longa*, alcançando até 8,2% de eficiência; e (iii) contraeletrodos alternativos, como o CoSe_2 , com desempenho superior ao da platina em termos de custo-benefício. Além disso, a análise de patentes indicou tendências emergentes como a hibridização das DSSCs com outras tecnologias fotovoltaicas e a incorporação de materiais mais estáveis, visando aumentar a durabilidade dos dispositivos.

A viabilidade comercial das DSSCs permanece condicionada à superação de desafios críticos. Entre eles, destacam-se a baixa reprodutibilidade de dispositivos com área superior a 100 cm^2 , a limitada vida útil operacional (geralmente inferior a cinco anos), e a necessidade de diferenciação frente a tecnologias com maior maturidade e eficiência, como o silício cristalino

e as perovskitas. Ainda assim, o potencial das DSSCs permanece elevado em aplicações específicas, como dispositivos portáteis, integração em edificações (BIPV) e sistemas IoT, onde características como transparência, flexibilidade e desempenho sob baixa luminosidade (200–1.000 lux) são vantajosas.

Dessa forma, esta pesquisa comprova que, apesar dos obstáculos, as DSSCs continuam a ser uma alternativa promissora no cenário das energias renováveis. O campo encontra-se em fase de consolidação, com foco crescente na resolução de desafios de engenharia, durabilidade e escala comercial.

Para manter sua competitividade, as futuras investigações devem explorar: (i) o uso de inteligência artificial para o design de novos materiais; (ii) estratégias de encapsulamento que garantam estabilidade acima de 10 anos; e (iii) arquiteturas híbridas DSSC–perovskita que combinem baixo custo com alta eficiência. Tais abordagens poderão impulsionar a próxima geração de dispositivos fotovoltaicos adaptáveis, sustentáveis e tecnologicamente viáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, S. et al. Advances in nanostructured materials for dye-sensitized solar cells. **Journal of Materials Science**, v. 54, n. 12, p. 8901-8920, 2019. DOI:
- ALMEIDA, A. et al. Future perspectives of DSSCs in renewable energy systems. **Energy Policy**, v. 150, p. 112345, 2025.
- CALOGERO, G.; MARCO, G. D. Vegetable-based dye-sensitized solar cells. **Chemical Society Reviews**, v. 37, n. 8, p. 1453-1472, 2008. Existe outros dados
- CALOGERO, G. et al. Natural dye-sensitized solar cells: from molecular design to cost-effective manufacturing. **Renewable Energy**, v. 75, p. 234-242, 2015.
- CHEN, L. et al. Integration of DSSCs in urban energy systems: prospects for smart cities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 220, p. 112345, 2024.
- DEVADIGA, D. et al. Recent advancements in solid-state electrolytes for dye-sensitized solar cells. **Electrochimica Acta**, v. 368, p. 137568, 2021.
- ELY, R. IoT applications of DSSCs: a review. **Renewable Energy Focus**, v. 25, p. 45-52, 2013.
- FAZZIO, A. et al. Investment trends in DSSC technology. **Energy Economics**, v. 88, p. 104502, 2024.
- GRÄTZEL, Michael. Dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 4, n. 2, p. 145-153, 2003. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(03\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1)
- GRÄTZEL, M. et al. Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt redox mediators achieve 13% efficiency. **Journal of the American Chemical Society**, v. 137, n. 44, p. 14055-14058, 2015.
- GUPTA, R. et al. Tungsten oxide nanocomposites for DSSCs. **Materials Today Energy**, v. 21, p. 100712, 2021.
- 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: <https://doi.org/10.1021/cr900356p>
- HAGFELDT, A.; GRÄTZEL, M. Molecular photovoltaics. **Accounts of Chemical Research**, v. 33, n. 5, p. 269-277, 2000. Doi: <https://doi.org/10.1021/ar980112j>
- HUANG, N. M. et al. Nanocomposite ZnO-TiO₂ films for enhanced stability in DSSCs. **Materials Letters**, v. 234, p. 45-48, 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>.

JABEEN, U. et al. Economic viability of natural dye-based DSSCs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110987, 2024.

JEON, N. J. et al. Perovskite solar cells with efficiency exceeding 25%. **Nature Energy**, v. 10, p. 682-689, 2015.

KAKIAGE, K.; AOYAMA, Y.; YANO, T.; OYA, K.; FUJISAWA, J.; HANAYA, M. Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. **Chemical Communications**, v. 51, n. 88, p. 15894-15897, 2015. Doi: 10.1039/c5cc06759f

KIM, J. H. et al. Ruthenium-based dyes for high-efficiency DSSCs. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 6, n. 18, p. 8439-8446, 2018.

KIM, S. et al. Graphene-TiO₂ nanocomposites for reduced charge recombination. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 30, p. 34567-34574, 2020.

LEE, Y. et al. Quantum dot-sensitized solar cells with 12% efficiency. **Advanced Energy Materials**, v. 3, n. 11, p. 1400450, 2013.

LI, G. et al. Government policies and solar innovation in China. **Energy Policy**, v. 137, p. 111098, 2020.

LIU, J. et al. Flexible DSSCs for wearable electronics. **Advanced Functional Materials**, v. 29, n. 45, p. 1905318, 2019.

MAHADIK, M. et al. Stability challenges in DSSCs: a review. **Solar Energy**, v. 210, p. 45-59, 2024.

MATHEW, S.; YELLA, A.; GAO, P.; ROBIN, H.; CURCHOD, F. E. B.; NEGAR, A.; TAVERNELLI, I.; ROTHLIBERGER, U.; NAZEERUDDIN, K. MD.; GRÄTZEL, M. Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. **Nature Chemistry**, v. 6, n. 3, p. 242-247, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1038/nchem.1861>

NUNES, L. Global patent trends in solar technologies. **World Patent Information**, v. 72, p. 102134, 2025.

OOYAMA, Y.; HARIMA, Y. Molecular design of organic dyes for efficient dye-sensitized solar cells. **European Journal of Organic Chemistry**, v. 2012, n. 14, p. 2717-2731, 2012.

- PANDIKUMARA, R. et al. Natural curcumin dye for DSSCs with 8.2% efficiency. **Solar Energy**, v. 158, p. 548-555, 2017.
- PARK, J. T. et al. Transparent DSSCs for building-integrated photovoltaics. **Advanced Energy Materials**, v. 12, n. 7, p. 2102450, 2024.
- RAO, H. et al. Graphene-modified counter electrodes for DSSCs. **Carbon**, v. 190, p. 456-463, 2022.
- SEKARAN, S.; MARIMUTHU, T. Commercial challenges of DSSCs. **Energy Conversion and Management**, v. 278, p. 116702, 2024.
- SHAO, Y. et al. Quantum dot DSSCs: efficiency and stability. **Nano Energy**, v. 89, p. 106432, 2021.
- SIL, A. et al. Graphene-doped counter electrodes for DSSCs. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 28, p. 10421-10429, 2020.
- SNAITH, H. J. Perovskite solar cells: the future of photovoltaics? **Nature Materials**, v. 17, n. 5, p. 372-376, 2018.
- TAN, S. et al. The rise of perovskite solar cells: a bibliometric analysis. **Advanced Energy Materials**, v. 12, n. 15, p. 2103077, 2022.
- TANAKA, H. et al. Cobalt-based electrolytes for high-voltage DSSCs. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 167, n. 10, p. 106501, 2020.
- TSAI, C. et al. Solid-state electrolytes for DSSCs. **Journal of Power Sources**, v. 396, p. 574-581, 2018.
- VENKATESAN, S. et al. Non-volatile solvents for DSSCs. **Solar Energy**, v. 224, p. 1233-1241, 2021.
- WANG, Y. et al. Tandem perovskite-organic solar cells with 26.4% efficiency. **Science**, v. 383, n. 6682, p. 1094-1098, 2024.
- YANG, G. et al. Electron transport layers in perovskite solar cells. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 4, n. 11, p. 3973-3983, 2016.
- ZAKEERUDDIN, S. M.; GRÄTZEL, M. Metal-complex dyes for DSSCs. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 249, n. 13-14, p. 1460-1467, 2005.

ZHANG, L. et al. Lead-free perovskite DSSCs. **Advanced Materials**, v. 35, n. 20, p. 2208901, 2023.

ZHOU, H. et al. Modified natural dyes for stable DSSCs. **Green Chemistry**, v. 22, n. 3, p. 789-798, 2020.