

PANORAMA TECNOLÓGICO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO

TECHNOLOGICAL OVERVIEW OF TITANIUM DIOXIDE PHOTOVOLTAIC
CELLS

Ciências Exatas e da Terra • 17/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/784276691](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/784276691)

Suzana Leitão Russo¹

Tecia Vieira Carvalho²

Flávio Ferreira da Conceição³

Roberto Augusto Caracas Neto⁴

RESUMO

Em um cenário de crescente demanda por energias limpas e sustentáveis, a pesquisa em tecnologias fotovoltaicas avançadas é crucial. Este estudo prospectivo investiga o desenvolvimento e aplicação de células fotovoltaicas baseadas em dióxido de titânio (TiO_2), abordando suas propriedades fundamentais, estratégias de dopagem e modificação morfológica, métodos de fabricação de filmes finos, e integração em arquiteturas emergentes como as células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) e as de perovskita. A metodologia emprega uma análise combinada de patentes e pesquisa científica com o objetivo de otimizar a eficiência, a estabilidade e a viabilidade comercial. Através da síntese e da interpretação de resultados de caracterizações estruturais, ópticas e elétricas, o trabalho visa identificar rotas inovadoras e a evolução da tecnologia por meio de patentes para superar os desafios contemporâneos. Além disso, tem por objetivos finais buscar mapear as empresas, os inventores e os países com maior número de pedidos e concessões de patentes, e a divulgação de artigos em idiomas nas bases de dados, contribuindo assim para a aceleração da transição energética global.

Palavras-chave: Dióxido de Titânio; Células Solares; Nanotecnologia.

ABSTRACT

In the context of increasing demand for clean and sustainable energy, research on advanced photovoltaic technologies has become essential. This prospective study examines the development and application of titanium dioxide (TiO_2)-based photovoltaic cells, addressing their fundamental properties, doping and morphological modification strategies, thin-film fabrication methods, and integration into emerging architectures such as dye-sensitized solar cells (DSSC) and perovskite solar cells. The

methodology combines patent analysis and scientific research to optimize efficiency, stability, and commercial feasibility. By synthesizing and interpreting structural, optical, and electrical characterization results, the study aims to identify innovative pathways and technological evolution—supported by patent trends—to overcome current challenges. Additionally, it seeks to map the companies, inventors, and countries with the highest number of patent filings and grants, as well as scientific publications in different languages and databases, thereby contributing to the acceleration of the global energy transition.

Keywords: Titanium Dioxide; Solar Cells; Nanotechnology.

1. INTRODUÇÃO

O panorama energético global é marcadamente influenciado pela imperativa transição para fontes renováveis, impulsionada pelos desafios das mudanças climáticas e a expansão da demanda por energia (Carneiro, 2024, p. 15). Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica emerge como uma das alternativas mais promissoras e abundantemente disponíveis, apresentando uma evolução tecnológica notável, que se estende desde as células de silício de primeira geração até sistemas de última geração (Alba-Cabañas, 2025, p. 3).

Embora as células solares de silício (monocristalino e policristalino), tradicionalmente predominem no mercado, atingindo eficiências laboratoriais de até 27,6%, a busca por alternativas mais acessíveis, eficientes e ambientalmente benignas catalisou o surgimento das tecnologias de segunda e terceira gerações (Alba-Cabañas, 2025, p. 3). As células de filme fino inorgânico oferecem uma solução economicamente viável, enquanto as células solares emergentes –

notadamente as sensibilizadas por corantes (DSSC), as de perovskita e as de pontos quânticos (QDSC) – definem a vanguarda tecnológica (Alba-Cabañas, 2025, p. 3). Estas últimas são caracterizadas por potenciais eficiências elevadas (até 30,1% para perovskitas em tandem) e uma redução substancial nos custos de produção, viabilizada pela nanotecnologia e pelo emprego de materiais sustentáveis (Alba-Cabañas, 2025, p. 3).

O dióxido de titânio (TiO_2), um semicondutor tipo-n, destaca-se como um material de notável interesse para estas tecnologias emergentes, em virtude de sua biocompatibilidade, baixo custo, abundância, fotoestabilidade, e propriedades ópticas e eletrônicas favoráveis, consolidando-o como um candidato promissor para diversas aplicações fotovoltaicas (Carneiro, 2024, p. 17).

Nesse cenário, torna-se fundamental não apenas compreender os avanços científicos, mas também mapear a proteção tecnológica via depósitos de patentes, visto que ambos os aspectos refletem os rumos da inovação e as trajetórias de mercado das células solares baseadas em TiO_2 .

Este trabalho apresenta uma pesquisa prospectiva que explora meticulosamente o potencial do TiO_2 em células fotovoltaicas, articulando dados de patentes e pesquisas científicas de ponta para impulsionar a inovação na concepção e fabricação de dispositivos fotovoltaicos mais eficientes e sustentáveis. Para tal, o presente trabalho está estruturado em seis seções: Introdução, Referencial Teórico (com subseções detalhadas, contextualização tecnológica e metodologia de pesquisa de materiais), Metodologia da Pesquisa de Prospeção, Discussão e Resultados, Conclusão e Referências Bibliográficas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O TiO_2 é um semicondutor do tipo-n extensivamente estudado em sistemas fotovoltaicos. Sua função primária reside na atuação como uma camada de transporte de elétrons, capitalizando sua alta transparência óptica e excelente mobilidade eletrônica (Carneiro, 2024, p. 17).

O TiO_2 apresenta propriedades estruturais e ópticas que manifesta polimorfismo, apresentando-se em três fases cristalinas principais na natureza: anatase (tetragonal), rutilo (tetragonal) e bruquita (ortorrômbica). Dentre essas fases, o *band gap* pode ser precisamente modulado através da inserção de outros elementos ou de métodos de modificação estrutural (Carneiro, 2024, p. 17-19).

As estratégias de modificação e dopagem do TiO_2 de semicondutores constituem uma estratégia altamente eficaz para modular suas propriedades ópticas e catalíticas. A incorporação de dopantes metálicos ou não-metálicos pode otimizar significativamente o desempenho fotocatalítico, mitigar a recombinação de pares elétron-buraco fotogerados, e ajustar a estrutura de banda eletrônica para ampliar a absorção de luz (Silva, M. K., 2023, p. 16; Costa, 2024, p. 23):

- **Dopagem com Não-Metais:** A dopagem com nitrogênio (N) em óxido de zinco (ZnO) exemplifica essa abordagem. O N atua como uma impureza apropriada devido à sua similaridade em eletronegatividade e raios iônicos com o oxigênio (SILVA, M. K., 2023, p. 16; QI *et al.*, 2017, p. 792). Este processo aprimora a atividade fotocatalítica e pode induzir uma estrutura eletrônica que estreita o *band gap*, estendendo a absorção para

comprimentos de onda mais longos (Silva, M. K., 2023, p. 23). A pesquisa de Silva, M. K. (2023, p.54) investigou a eficácia de filmes de ZnO dopados com N₂ para inativação de microrganismos, revelando que todos os filmes mantiveram uma estrutura hexagonal wurtzita.

- **Dopagem com Íons de Terras Raras (TR³⁺):** Íons como Eu³⁺, Tb³⁺ e Yb³⁺ podem ser incorporados na matriz de TiO₂. Carneiro (2024, p.28, 68) demonstrou que a dopagem de TiO₂ com 0,1% em mol de Yb³⁺, combinada com tratamentos térmicos a 700 °C, resultou em tamanhos de cristalito e luminescência otimizados, configurando o material como promissor para conversão de energia. A influência desses íons na rede cristalina do TiO₂ é crucial, pois promove a mudança de fase do rutilo para anatase, um aspecto essencial para a efetividade dos processos fotocatalíticos e sistemas fotovoltaicos.

As aplicações e patentes em células fotovoltaicas com óxido de titânio (TiO₂) é um componente crítico em diversas arquiteturas de células solares emergentes:

- **Células Solares Sensibilizadas por Corantes (DSSC):** Nestes dispositivos, uma camada mesoporosa e nanocristalina de TiO₂ funciona como fotoânodo, onde um corante sensibilizador adsorve a luz e injeta elétrons na banda de condução do TiO₂ (Costa, 2024, p. 25). Patentes e artigos detalham a deposição da pasta de TiO₂ e sua subsequente sensibilização (Costa, 2024, p. 23). Contudo, a estabilidade do corante e dos eletrólitos líquidos persiste como um desafio significativo para a comercialização (Costa, 2024, p. 23).

- **Células Solares de Perovskita:** O TiO_2 é frequentemente empregado como camada de transporte de elétrons (ETL) nessas células (Alba-Cabañas, 2025, p. 6). Uma patente australiana (AU 2023250513 A1) descreve células fotovoltaicas de perovskita que incorporam uma camada absorvedora de perovskita, uma camada ultrafina de transporte de lacunas, e barreiras contra difusão de metais (como TiO_2 , TiN , etc.), visando aplicações em painéis solares de alta eficiência (tandem perovskita-silício). A espessura ideal da camada de TiO_2 geralmente varia entre 10 nm e 200 nm (PATENTE AU 2023250513 A1, 2023).
- **Barreiras e Camadas Protetoras:** O TiO_2 também pode desempenhar o papel de camada compacta para bloquear o contato direto entre o par redox (em DSSC) ou o eletrodo e o substrato, prevenindo a recombinação de cargas e, consequentemente, aumentando a fotovoltagem (Alba-Cabañas, 2025, p. 27).

As reivindicações de patentes sublinham a **versatilidade intrínseca do TiO_2** :

- • Uma célula solar fotovoltaica pode compreender um substrato transparente condutor, uma camada de transporte de elétrons de TiO_2 , uma camada absorvedora de perovskita (ABX_3), uma camada de transporte de lacunas e um eletrodo metálico (PATENTE AU 2023250513 A1, 2023).
- • A camada de TiO_2 pode ser dopada com cátions metálicos como Sn, Nb, Zr ou Ta (PATENTE AU 2023250513 A1, 2023). Um estudo de Oliveira et al. (2024) demonstrou que a produção de

células solares sensibilizadas com $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ resultou em um aumento significativo na eficiência de conversão com a inserção de Nióbio.

- Os métodos de deposição incluem deposição em fase de vapor (CVD), deposição em camada atômica (ALD) ou *spin-coating* (PATENTE AU 2023250513 A1, 2023).

Outros óxidos semicondutores como ZnO, CuO e NiO também são relevantes para heteroestruturas fotovoltaicas. O ZnO é um semicondutor tipo-n, o CuO tipo-p e material absorvente, e o NiO tipo-p para transporte de lacunas (HTL) (Alba-Cabañas, 2025, p. 10). A integração desses materiais em dispositivos como ZnO/CuO/NiO pode impactar significativamente a eficiência de conversão de energia (Alba-Cabañas, 2025, p. 10).

A pesquisa em células fotovoltaicas emergentes visa superar as limitações das tecnologias tradicionais, concentrando-se na eficiência, na estabilidade e na redução de custos. As células solares sensibilizadas por corantes (DSSC), introduzidas por Michael Grätzel e Brian O'Regan em 1991, emergiram como uma alternativa econômica (Costa, 2024, p. 22). Elas combinam um sensibilizador orgânico (corante) com um semicondutor de banda proibida larga, como o TiO_2 ou ZnO (COSTA, 2024, p. 23). O TiO_2 nanoporoso atua como eletrodo, facilitando a conversão da luz solar em eletricidade (COSTA, 2024, p. 23). Contudo, a estabilidade dos corantes à base de rutênio e dos eletrólitos líquidos ainda representa um obstáculo à comercialização (Costa, 2024, p. 23). A proposta de Costa (2024) investiga a utilização de corantes azos alimentares em DSSCs pancromáticas (PDSSC) para ampliar a absorção de luz no espectro visível, otimizando a eficiência. O estudo demonstrou que misturas

binárias de corantes podem elevar a eficiência em comparação com o uso de um único corante (Costa, 2024, p. VIII).

As células solares de perovskita representam uma das tecnologias fotovoltaicas mais promissoras, caracterizadas por altas eficiências e potencial de integração com células de silício (Alba-Cabañas, 2025, p. 3). A otimização de interfaces nessas arquiteturas é crucial para reduzir recombinação e as perdas de carga, conforme evidenciado na patente WO 2024118031 A2. Patentes, como a AU 2023250513 A1, propõem células de perovskita com camadas ultrafinas de transporte de lacunas e barreiras contra difusão de metais (TiO_2 , TiN) para aumentar a eficiência em painéis *tandem*. O trabalho de Sánchez Fernández (2024) explorou a otimização da espessura das camadas de TiO_2 depositadas por rocío pirolítico, buscando a fase anatase cristalina para aplicações em DSSC. A qualidade do material precursor e a uniformidade do depósito são aspectos fundamentais para um desempenho ideal.

Figura 1. Corte esquemático de célula solar de perovskita com TiO_2

5	Legenda: 1 – Substrato transparente condutor (vidro + ITO/FTO) 2 – Camada de transporte de elétrons (TiO_2) 3 – Camada absorvedora de perovskita (ABX_3) 4 – Camada de transporte de lacunas (HTL) 5 – Eletrodo metálico (Au, Ag, Al etc.)
4	
3	
2	
1	

Fonte: AU 2023250513 A1

3. METODOLOGIA

Para a prospecção de patentes, utilizou-se a base Espacenet (EPO), aplicando o seguinte comando de busca, STRING USADA: *(NFTXT="TiO2 layer" OR nftxt="Titanium dioxide layer") AND (nftxt="perovskite solar cell" OR nftxt="DSSC" OR nftxt="dye sensitized solar cell")*.

Com o intuito de reduzir ruídos linguísticos e limitações técnicas de tradução, foram excluídos os depósitos da China, Coreia e Taiwan, resultando em um conjunto de 434 documentos de patentes considerados para análise. Os registros foram organizados e tratados a partir de estatísticas descritivas, contemplando indicadores como evolução temporal dos depósitos, distribuição geográfica, principais solicitantes, classificação IPC/CPC associada e áreas tecnológicas relacionadas, além de dados como depositantes e inventores.

A prospecção científica foi conduzida nas bases Google Acadêmico, Portal de Periódicos da CAPES, EBSCOhost, Scielo Brasil e busca integrada de periódicos da UNIFOR, utilizando-se as palavras-chave: *células solares fotovoltaicas* e *“dióxido de titânio”*. A busca abrangeu diferentes idiomas e o período de 1984 a 2025, considerando apenas artigos revisados por pares. Foram eliminadas duplicatas e trabalhos redundantes, resultando em um corpus consistente para análise.

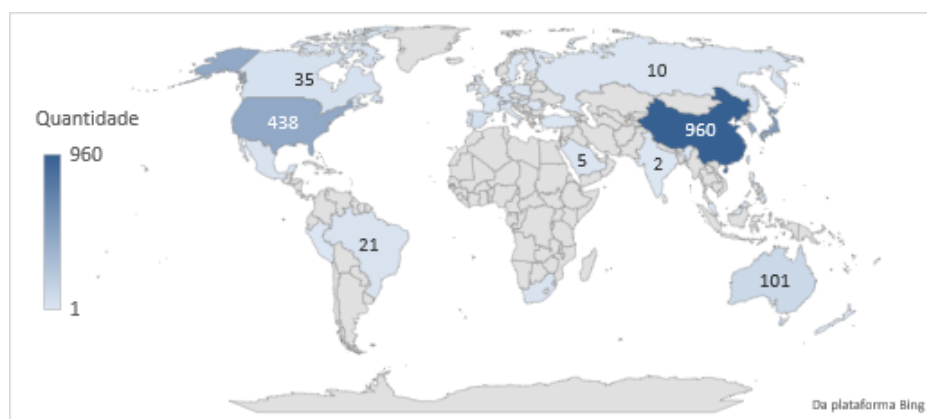
Os dados obtidos foram integrados e analisados em conjunto, permitindo a correlação entre avanços científicos e tendências tecnológicas, com o objetivo de identificar rotas inovadoras, potenciais aplicações industriais e a evolução da tecnologia fotovoltaica baseada em TiO₂.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta a discussão e os resultados antecipados da pesquisa prospectiva, utilizando a metodologia de prospecção de patentes e das informações dos documentos fornecidos para ilustrar as possíveis observações e suas interpretações. de classificações de patentes, as empresas (depositantes) e os inventores encontrados na prospecção, e as tendências tecnológicas do dióxido de titânio em células fotovoltaicas, refletem os principais focos de pesquisa e desenvolvimento industrial na área com fotografia transversal e longitudinal.

As patentes foram depositadas em diversos países, com destaque para a China (960 patentes), seguida pelos Estados Unidos da América (EUA) com 438, Austrália (101), Canadá (35), Brasil (21), Rússia (10) e Arábia Saudita (5). As patentes da Organização Europeia de Patentes (OPE/EPO) com 309 registros e da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI/WIPO) com 362, não foram incluídas em uma contagem por país específico, conforme o mapa de famílias de patentes, na Figura 2 (Countries).

Figura 2. Mapa dos Países das famílias de patentes

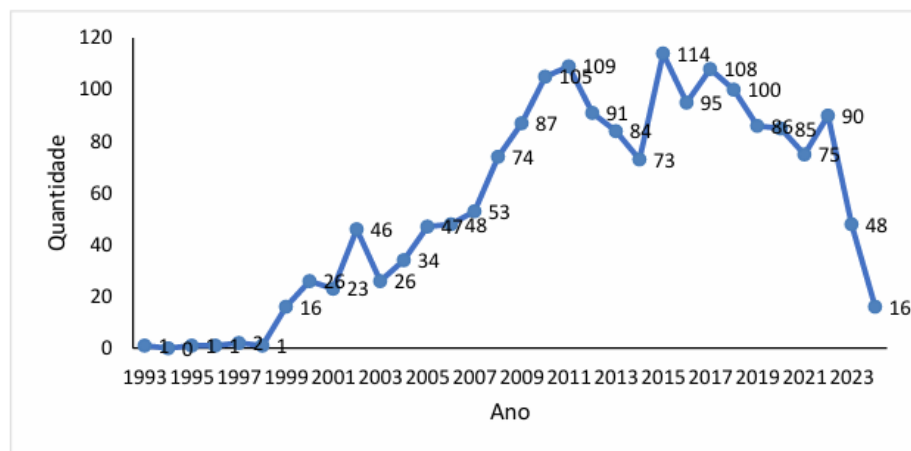


Fonte: Autoria própria (2025)

O histórico de publicações de patentes por data de prioridade, consolidado na Figura 3, indica que os avanços nas pesquisas tiveram início em 1993, atingindo seu ápice em 2015, com uma

queda abrupta a partir de 2022. O mapa de Inventores mostra que a maioria dos inventores é dos EUA (119), seguidos por chineses (78), indianos (19), australianos (12), canadenses (6), e russos e sauditas empatados com 3 cada.

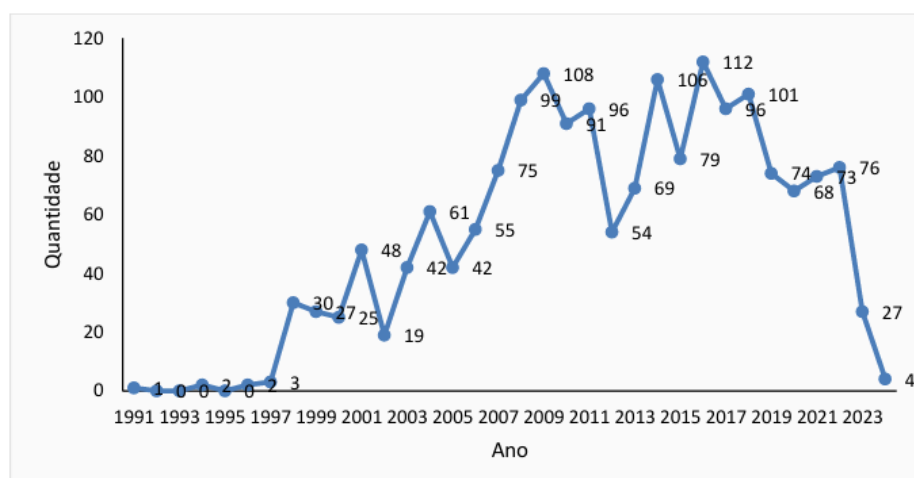
Figura 3. Evolução temporal



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 4, referente às datas de prioridade mais antiga (*Earliest priority date*), ou seja, a data do primeiro depósito, demonstra que iniciaram em 1991, com seu ápice em 2015 e o início de uma queda a partir de 2017.

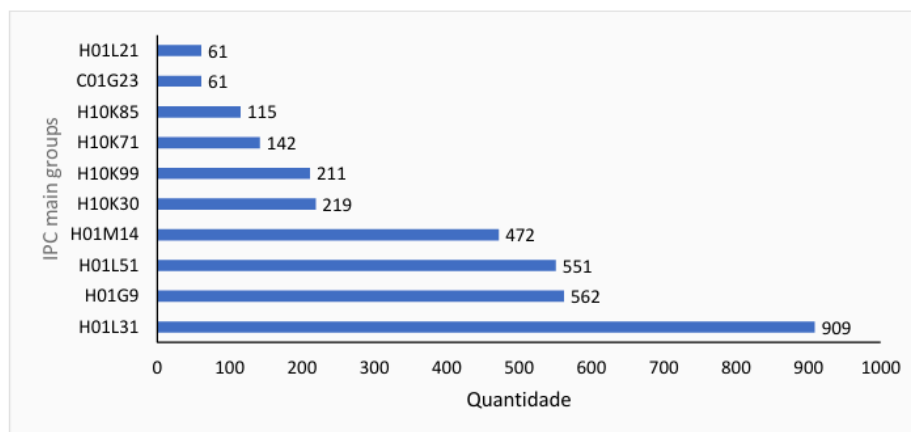
Figura 4. Data de Prioridade



Fonte: Autoria própria (2025)

Em relação às classificações de patentes (IPC - International Patent Classification), os grupos mais solicitados são H01L31 com 909 pedidos, seguido por H01G9 (562 pedidos) e H01L51 (551 pedidos), conforme a Figura 5:

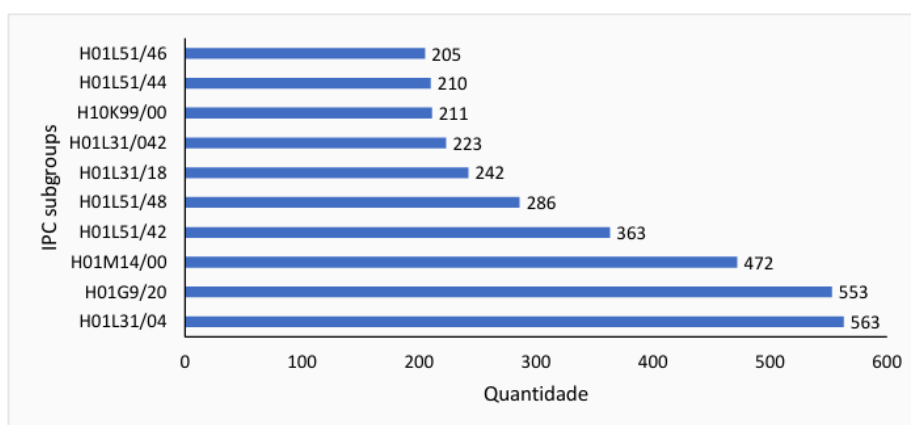
Figura 5. IPC – Classificação Internacional de Patentes dos grupos principais



Fonte: Autoria própria (2025)

Nos subgrupos do IPC, destaca-se H01L31/04 com 563 pedidos, seguido por H01G9/20 (553 pedidos) e H01M14/00 (472 pedidos), como mostra a Figura 6.

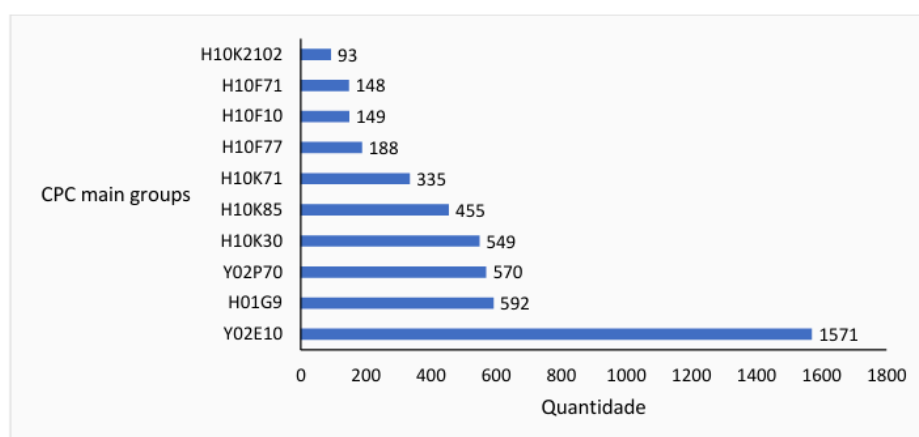
Figura 6. IPC – Classificação Internacional de Patentes dos subgrupos



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a CPC (Cooperative Patent Classification), os grupos mais solicitados são Y02E10 com 1.571 pedidos, seguido por H01G9 (592 pedidos) e Y02P70 (570 pedidos), conforme a Figura 7.

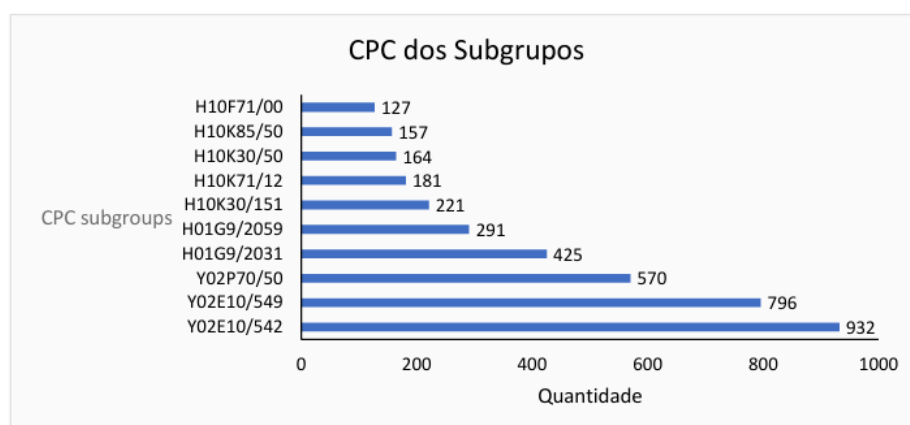
Figura 7. CPC – Classificação Cooperativa de Patentes do Grupos Principais



Fonte: Autoria própria (2025)

Nos subgrupos do CPC, destaca-se Y02E10/542 com 932 pedidos, seguido por Y02E10/549 (796 pedidos) e Y02P70/50 (570 pedidos), como ilustrado na Figura 8.

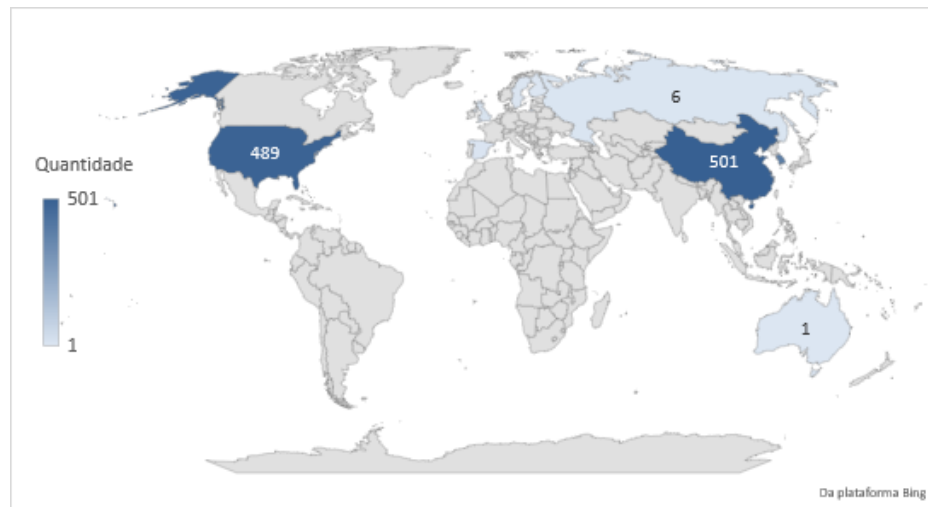
Figura 8. CPC – Classificação Cooperativa de Patentes do Subgrupos



Fonte: Autoria própria (2025)

O mapa mundial dos Escritórios de Patentes das CPC (Figura 9) indica a China como líder com 501 pedidos, seguida pelos EUA com 489 pedidos, Rússia com 6 e Austrália com 1.

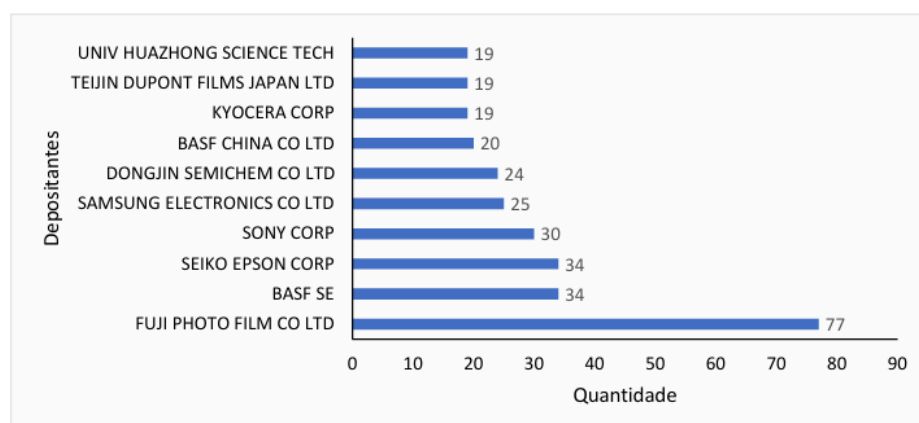
Figura 9. Escritórios de Patentes das CPC



Fonte: Autoria própria (2025)

Quanto aos maiores depositantes, a Figura 10 (Depositantes) demonstra que a Fuji Photo Film Ltda. lidera com 77 pedidos, seguida pela Basf SE e Seiko Epson Corp. (ambas com 34), e Sony Corp. (30) e Samsung Electronics Corp. Ltda. (25):

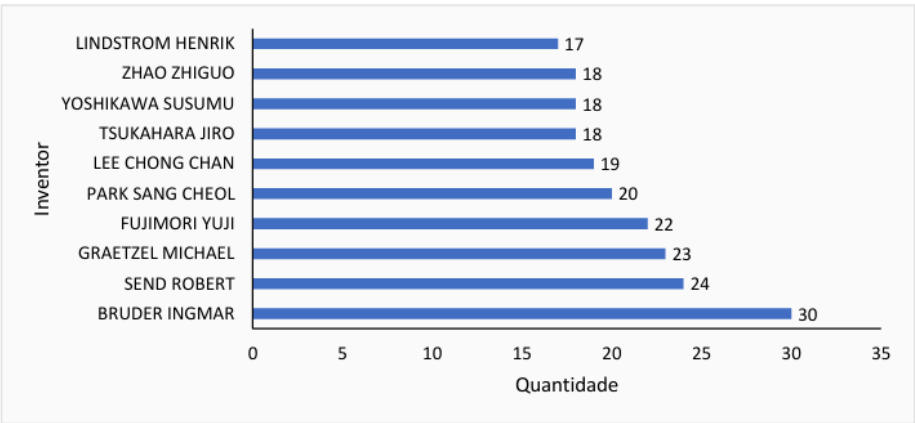
Figura 10. Depositantes



Fonte: Autoria própria (2025)

Entre os inventores, a Figura 11, destaca o Sr. Bruder Ingmar com 30 pedidos, seguido pelos Srs. Send Robert (24) e Grätzel Michael (23).

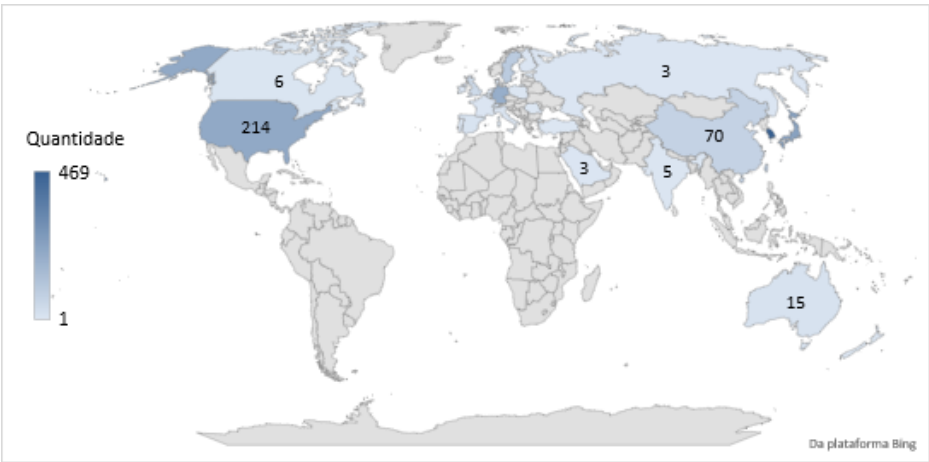
Figura 11. Inventores



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 12 (Países dos depositantes) mostra que as empresas depositantes são predominantemente dos EUA (214), China (70), Austrália (15), Canadá (6), Índia (5), Arábia Saudita (3) e Rússia (3).

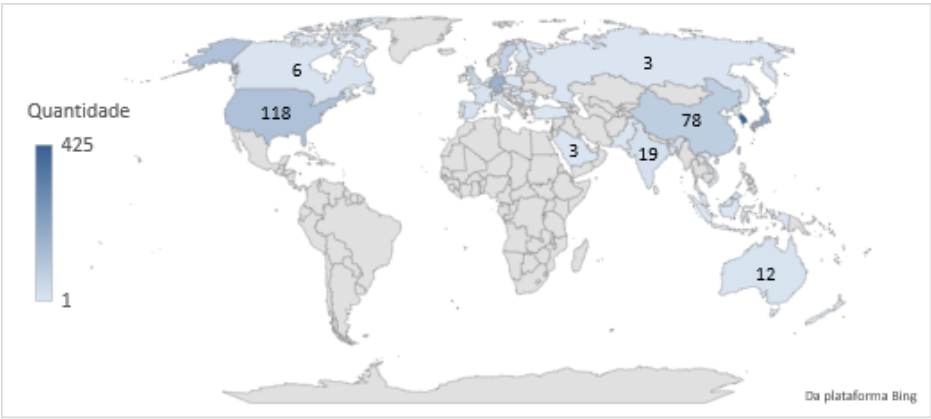
Figura 12. Países dos Depositantes



Fonte: Autoria própria (2025)

O mapa dos países dos Inventores (Figura 13) reitera que a maioria dos inventores é dos EUA (119), China (78) e Índia (19).

Figura 13. Países dos inventores



Fonte: Autoria própria (2025)

As correlações existentes entre as classificações de patentes, as empresas (depositantes) e os inventores na pesquisa de prospecção e das tendências tecnológicas refletem que o foco das pesquisas e o desenvolvimento industrial na área estão concentrados em três pilares: otimização da arquitetura do dispositivo, estabilidade química/estrutural e viabilidade econômica em escala industrial, conforme as tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Correlação das Classificações de Patentes (IPC e CPC)

Classificaç ão (IPC/PCT)	Pedidos	Foco tecnológico	Correlação com TiO ₂
H01L31 (grupo principal)	909	Semicondutores para conversão de energia radiante em energia elétrica (Células Solares)	Material central em dispositivos fotovoltaicos e semicondutores emergentes
H01L31/04 (subgrupos)	563	Células solares ou módulos de painel que não sejam de película fina.	Volume significativo de patentes sobre a estrutura e o desempenho da célula solar como um todo, onde o TiO₂ é tipicamente uma camada

			de transporte de elétrons (ETL) ou fotoânodo
H01G9 (grupos principais)	562	Capacitores e tecnologia associada (incluindo eletrolíticos).	O subgrupo H01G9/20 (553 pedidos) é usado para classificar as Células Solares Sensibilizadas por Corantes (DSSC) , onde o TiO₂ nanocristalino atua como o eletrodo/fotoânodo
H01L51 (grupos principais)	551	Dispositivos semicondutores baseados em materiais orgânicos.	As células de Perovskita (ABX ₃) e outras células solares híbridas/orgânicas, que utilizam TiO₂ como camada de transporte de elétrons
Y02E10 (grupos principais)	1.571	Tecnologias para mitigação das mudanças climáticas relacionadas à geração de energia (foco em solar)	O alto volume (1.571 pedidos) demonstra o foco industrial e o reconhecimento global da tecnologia TiO₂ como parte essencial da transição energética. O subgrupo Y02E10/542 (932 pedidos) está associado às células solares de filme fino.

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 2. Correlação dos inventores e depositantes

Dado	Principais Envolvidos	Tendência Tecnológica
Inventores	Michael Grätzel (23 pedidos)	Confirma o foco na tecnologia DSSC. Grätzel é o pioneiro das

		células solares sensibilizadas por corantes (DSSC), introduzidas em 1991. Sua alta taxa de patenteamento indica a contínua busca por melhorias em eficiência, estabilidade do corante e eletrólitos líquidos, que ainda são desafios
Depositantes (Empresas)	Fuji Photo Film Ltda. (77 pedidos), BASF SE (34 pedidos), Seiko Epson Corp. (34 pedidos), Sony Corp. (30 pedidos), Samsung Electronics (25 pedidos).	A presença de grandes empresas de eletrônicos, filmes e produtos químicos (como Fuji, Sony, Samsung e BASF) indica um foco intenso na viabilidade comercial e na escalabilidade dos processos de fabricação . Essas empresas buscam a integração do TiO₂ em dispositivos por métodos de baixo custo e alta precisão, como spin-coating e deposição em fase de vapor.
Inventores em Geral	Bruder Ingmar (30 pedidos) e Send Robert (24 pedidos)	Sua liderança em volume de pedidos, juntamente com a predominância de inventores dos EUA (119) e China (78), sugere uma ênfase na solução dos desafios de estabilidade e na otimização da arquitetura de células de perovskita e DSSC.

Fonte: os autores

Analisando as correlações estratégicas de forma integrativa de patentes e pesquisas de desenvolvimento de tecnologias constatamos que as pesquisas estão orientadas na direção de reforçar a superação dos desafios de: modulação de desempenho para o controle preciso da **estrutura cristalina e** a redução da recombinação de cargas nas interfaces **para maximizar o desempenho dos dispositivos;** soluções de estabilidade para os

desafios de estabilidade dos componentes; inovação em materiais para aprimorar a absorção de luz e a separação de cargas; e métodos de fabricação industrial flexíveis como sol-gel, eletrodeposição, pulverização catódica e rocío pirolítico visando a **viabilidade econômica em nível industrial.**

5. CONCLUSÃO

Os resultados extraídos da análise patentária revelam que a **modulação do *band gap* do TiO_2** , a redução da recombinação de cargas nas interfaces e o controle preciso da estrutura cristalina (priorizando a fase anatase) são elementos chave para maximizar o desempenho dos dispositivos. Métodos de fabricação como *sol-gel*, eletrodeposição, pulverização catódica e rocío pirolítico oferecem a flexibilidade necessária para o desenvolvimento de materiais com características sob medida.

Os países com maior número de cientistas que estudam e desenvolvem patentes são os Estados Unidos e a China. Os pedidos e concessões de patentes nesta tecnologia iniciaram na década de 1990, tiveram seu auge entre 2015 e 2017, seguindo-se uma significativa queda nos depósitos de patentes.

A pesquisa patentária focou nos seguintes desafios e oportunidades:

- **desafios de estabilidade dos componentes**, especialmente em DSSC e células de perovskita, ao longo dos anos, bem como o mapeamento das empresas, inventores, registros, concessões e família de patentes mais pesquisadas.
- **novas combinações de dopantes e heteroestruturas** para aprimorar a absorção de luz e a separação de cargas, com

análise da combinação de patentes por subgrupos.

- **processos de fabricação** visando maior viabilidade econômica em nível industrial, mantendo alta eficiência.

O TiO_2 permanece um pilar fundamental para o avanço das tecnologias de energia solar. A pesquisa contínua e inovadora neste campo é essencial para impulsionar a transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, contribuindo para um futuro energético mais promissor.

Perspectivas Futuras

O futuro da tecnologia com base no TiO_2 depende de inovações na área de manipulação das propriedades fundamentais dos semicondutores, a exemplo das iniciativas de otimização avançada de materiais e estruturas com: modulação do Band Gap e estruturas cristalinas; nas novas dopagens e heteroestruturas; e integração de outros semicondutores. Os esforços voltados para o aumento da estabilidade e redução de perdas das células emergentes (DSSC e perovskita) que orientam para: estabilidade de componentes; controle de interfaces e recombinação; barreiras de difusão, ou ainda, para viabilidade industrial e econômica possibilitando a competitividade com o silício e sua produção em massa e a acessibilidade com: processos de fabricação econômicos; e flexibilidade e customização.

Essas iniciativas e pesquisas poderão contribuir para a transição energética global de forma contínuo e inovadora, pois são essenciais para impulsão de forma promissora das fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA-CABAÑAS, J. A. **Aportes a la fabricación de óxidos semiconductores nanoestructurados y su integración en estructuras y dispositivos fotovoltaicos emergentes.** 2025. Tese (Doutorado em Ciências Físicas) – Universidad de La Habana, Facultad de Física – IMRE, La Habana.

CARNEIRO, J. A. **Termometria óptica e conversão de energia em partículas de TiO₂ dopadas com íons TR³⁺ obtidas pelo método sol-gel.** 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

COSTA, A. E. M. **Células solares sensibilizadas por corantes pancromáticos.** 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

FONSECA, F. J.; ANDRADE, A. M.; FLACKER, A. **Películas de dióxido de titânio para uso em conversão fotovoltaica depositadas por bombardeamento reativo.** *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, São Paulo, v. 4, n. 1-2, p. 53-61, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.17563/rbav.v4i1-2.826>. Disponível em: <https://www.sbvacu.org.br/rbav/index.php/rbav/article/view/826/0>. Acesso em: 26 ago. 2025.

OLIVEIRA, M. R. N. et al. Produção de células solares de TiO₂:Nb sensibilizadas com corantes naturais. **Revista SODEBRAS**, Brasília, v. 221, maio/junho de 2024.

PATENTE AU 2023250513 A1. Célula fotovoltaica de perovskita com camada ultrafina de transporte de lacunas e barreiras contra difusão

de metais (TiO_2 , TiN , etc.). Aplicação em painéis solares de alta eficiência (*tandem* perovskita-silício). 2023.

PATENTE WO 2024118031 A2. Arquitetura de célula solar baseada em perovskita com interfaces otimizadas para reduzir recombinação. Escalabilidade industrial em módulos solares de perovskita. 2023.

QI, K. et al. Review on the improvement of the photocatalytic and antibacterial activities of ZnO . **Journal Of Alloys And Compounds**, v. 727, p. 792-820, 2017.

SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, R. de J.. **Depósito y caracterización de capas compactas de TiO_2 por rocío pirolítico con aplicaciones en celdas solares sensibilizadas por colorantes**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

SILVA, M. K. da. **Inativação fotoeletroquímica de microrganismos sobre filmes de óxido de zinco dopado com nitrogênio**. 2023. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual do Piauí, Teresina.

WANG, R. et al. Y/Eu co-doped TiO_2 : Synthesis and photocatalytic activities under UV-light. **Journal of Rare Earths**, v. 33, n. 2, p. 154–159, 1 fev. 2015.

¹ Pós-Doutorado em Transferência de Tecnologia pela University of South Florida (USA) (2015/2016), Pós-Doutorado em Métodos Quantitativos Aplicados à Gestão pela Universidade de Algarve em Faro/Portugal (2005), Doutorado em Engenharia de Produção pela

UFSC (2002). <https://orcid.org/0000-0001-9810-274X>.
<http://lattes.cnpq.br/8056542335438905>

² Pós doutorada pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Engenharia de Software (INES) Pós-doutorado pelo Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, doutorado em Biotecnologia pela RENORBIO - Universidade Federal do Ceará - UFC (2010). <https://orcid.org/0000-0001-9999-5009>.
<http://lattes.cnpq.br/0000111305956227>

³ Possui Licenciatura em Matemática pela Universidade Tiradentes (2010), Bacharelado em Estatística pela Universidade Federal de Sergipe (2017), é Mestrando em Ciência da Propriedade Intelectual pela UFS. Têm experiência em Matemática e previsões modelo Box e Jenkins. <https://orcid.org/0000-0002-7120-556X>.
<http://lattes.cnpq.br/5580701120398065>

⁴ Atualmente é Doutorando na Academia INPI, no curso de Doutorado Profissional em Propriedade Intelectual e Inovação. Mestre em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação (IFCE) (2022). <https://orcid.org/0000-0001-8484-411X>.
<http://lattes.cnpq.br/4553279121829196>