

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Catarina Christima Nogueira de Oliveira



ANÁLISE DO PANORAMA MUNDIAL DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS POR MEIO DA ELABORAÇÃO DE
UM ROADMAP TECNOLÓGICO

RIO DE JANEIRO

2024

Catarina Christima Nogueira de Oliveira

**ANÁLISE DO PANORAMA MUNDIAL DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS POR MEIO
DA ELABORAÇÃO DE UM ROADMAP TECNOLÓGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira de Bioprocessos.

Orientadora: Suzana Borschiver

Rio de Janeiro

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

046a Oliveira, Catarina Christima Nogueira de
Análise do Panorama Mundial de Células
Fotovoltaicas por meio da Elaboração de um Roadmap
Tecnológico / Catarina Christima Nogueira de
Oliveira. -- Rio de Janeiro, 2024.
105 f.

Orientadora: Suzana Borschiver.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia de Bioprocessos,
2024.

1. Roadmap Tecnológico. 2. Células Fotovoltaicas.
3. Painéis Solares. 4. Prospecção Tecnológica. I.
Borschiver, Suzana, orient. II. Título.

Catarina Christima Nogueira de Oliveira

**ANÁLISE DO PANORAMA MUNDIAL DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS POR MEIO
DA ELABORAÇÃO DE UM ROADMAP TECNOLÓGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheira de
Bioprocessos.

Aprovado em 16 de dezembro de 2024.

Suzana Borschiver, DSc., Escola de Química, UFRJ (orientadora).

Felipe Coelho Cunha, DSc., Escola de Química, UFRJ.

Estevão Freire, DSc., Escola de Química, UFRJ.

Rio de Janeiro

2024

*Aos meus pais, Marta e José, à minha irmã,
Carolina, aos meus familiares, amigos e
professores pelo apoio durante a graduação.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marta e José, por me apoiarem incondicionalmente durante todos os anos da minha vida e sempre cuidarem de mim.

À minha irmã, Carolina, por ser uma inspiração e um exemplo de dedicação e força no meio acadêmico e profissional.

À minha família, por compreender que nem sempre pude estar presente durante datas comemorativas e eventos importantes.

Aos meus poucos amigos, que, apesar de não me verem com frequência, sempre desejaram o meu melhor.

Aos meus professores, do jardim da infância à graduação, por compartilharem comigo um pouco de sua sabedoria e experiência.

À professora Suzana Borschiver, por sua orientação e empenho durante a disciplina Gestão e Inovação de Propriedade Intelectual que resultou na elaboração deste trabalho.

Aos funcionários da UFRJ, em especial da Escola de Química, por se empenharem em proporcionar o melhor ambiente de convivência e estudo possível aos alunos.

Ao meu falecido pet, Franjinha, por ter sido, e continuar sendo, a luz na minha vida nos momentos mais difíceis.

*“We are all like fireworks. We climb, shine and
always go our separate ways and become
further apart. But even if that time comes, let’s
not disappear like a firework, and continue to
shine forever.”*

Toshiro Hitsugaya

RESUMO

OLIVEIRA, Catarina Christima Nogueira de. **Análise do Panorama Mundial de Células Fotovoltaicas por meio da Elaboração de um Roadmap Tecnológico.** Orientadora: Suzana Borshiver. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O tema do presente trabalho está inserido no contexto da transição energética e novas fontes de energia renovável, mais especificamente a energia gerada por células fotovoltaicas, de forma a diminuir o uso de combustíveis fósseis. Este trabalho tem como principal objetivo analisar o direcionamento do desenvolvimento tecnológico mundial da utilização de células fotovoltaicas em horizonte temporal definido por meio da ferramenta de Roadmap Tecnológico. O Roadmap Tecnológico é uma importante ferramenta de prospecção tecnológica pelo qual é possível identificar as principais tendências tecnológicas e mercadológicas acerca do assunto escolhido na forma de mapa. A metodologia empregada é dividida em três etapas: etapa pré-prospectiva, etapa prospectiva e etapa pós-prospectiva. A etapa pré-prospectiva consiste na coleta inicial de informações para o entendimento do tema e definição das taxonomias a serem elaboradas nos documentos analisados. As taxonomias definidas para as células fotovoltaicas são divididas entre Aplicação, Matéria-Prima, Propriedades, Processo de Produção, Algoritmo, Equipamento, Otimização e Produto. A etapa prospectiva representa a consolidação das informações obtidas nos documentos analisados, que são organizadas em diferentes níveis de especificação. Na etapa pós-prospectiva, há a conexão das informações colhidas nos documentos que servem como base para a construção do Roadmap Tecnológico. O Roadmap Tecnológico possui um eixo temporal horizontal, dividido em Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo, e um eixo vertical, que compreende as principais características tecnológicas referente ao tema. Os resultados mostraram que a presença de empresas chinesas, como TrinaSolar, LongiSolar e Aiko, atuando no setor de células fotovoltaicas ao longo de todo o eixo temporal do Mapa, com objetivo final de vender painéis solares, e a presença destacada de universidades chinesas, como a Xidian University, que atua tanto em parcerias como também atua individualmente nas pesquisas. Em relação às tendências tecnológicas observadas, cabe ressaltar o uso de óxidos metálicos como matéria-prima, o emprego da diversos algoritmos para otimizar e entender propriedades das células fotovoltaicas e o próprio painel solar como alguns dos principais destaques de tendências tecnológicas.

Palavras-chave: Roadmap tecnológico; células fotovoltaicas; painéis solares; prospecção tecnológica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema de célula fotovoltaica, módulo fotovoltaico e painel ou arranjo fotovoltaico.	5
Figura 2: Comparação visual de células fotovoltaicas compostas por silício amorfo, policristalino e monocrystalino.	7
Figura 3: Sequência de filmes normalmente utilizada na célula solar a filme fino CdS/CdTe (“backwall”).	8
Figura 4: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos off-grid sem armazenamento.	10
Figura 5: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos off-grid com armazenamento.	10
Figura 6: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos on-grid.	11
Figura 7: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos híbridos.	12
Figura 8: Capacidade instalada acumulada de energia solar em GW.	16
Figura 9: Painel solar off-shore na Cingapura.	24
Figura 10: A "curva de aprendizado" (curva de experiência de preço) para módulos fotovoltaicos.	25
Figura 11: Crescimento global acumulado de painéis fotovoltaicos.	26
Figura 12: Esquema do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos.	39
Figura 13: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino.	40
Figura 14: Reciclagem e os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos painéis solares.	41
Figura 15: Representação de módulos fotovoltaicos da 1 ^a geração.	43
Figura 16: Representação de módulos fotovoltaicos da 2 ^a geração.	44
Figura 17: Representação de módulos fotovoltaicos da 3 ^a geração.	44
Figura 18: Curva de projeção da relação peso por potência do painel fotovoltaico (t/MW).	47

Figura 19: Projeção de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050.	48
Figura 20: Correlação entre tecnologia, desenvolvimento de produto ou serviço e oportunidades de mercado a partir de um Roadmap genérico.	50
Figura 21: Resultados da busca de artigos científicos na plataforma Scopus.	56
Figura 22: Refino da busca de artigos científicos na plataforma Scopus.	56
Figura 23: Artigos científicos publicados por ano na plataforma Scopus.	57
Figura 24: Artigos científicos publicados por país ou território na plataforma Scopus.	58
Figura 25: Artigos científicos publicados por autor na plataforma Scopus.	59
Figura 26: Artigos científicos publicados por fonte na plataforma Scopus.	59
Figura 27: Artigos científicos publicados por associação na plataforma Scopus.	60
Figura 28: Artigos científicos publicados por área temática na plataforma Scopus.	61
Figura 29: Artigos científicos publicados por patrocinador de financiamento na plataforma Scopus.	61
Figura 30: Palavras-chaves utilizadas para a busca de patentes depositadas encontradas na plataforma WIPO.	62
Figura 31: Principais países citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.	64
Figura 32: Principais <i>applicants</i> citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.	64
Figura 33: Principais <i>players</i> citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.	65
Figura 34: Série histórica obtida durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.	65
Figura 35: Palavras-chaves utilizadas para a busca de patentes concedidas encontradas na plataforma WIPO.	66
Figura 36: Principais países citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.	68

Figura 37: Principais <i>applicants</i> citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.	68
Figura 38: Principais <i>players</i> citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.	69
Figura 39: Série histórica obtida durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.	69
Figura 40: Análise Meso Taxonomia “Matéria-prima”.	71
Figura 41: Análise Meso Taxonomia “Propriedade”.	72
Figura 42: Análise Meso Taxonomia “Aplicação”.	73
Figura 43: Análise Meso Taxonomia “Produto”.	73
Figura 44: Análise Meso Taxonomia “Algoritmo”.	74
Figura 45: Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas completo.	75
Figura 46: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Estágio Atual (Ano Zero).	76
Figura 47: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Curto Prazo.	77
Figura 48: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Médio Prazo.	79
Figura 49: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Longo Prazo.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre painéis de silício cristalino e painéis CdTe.	9
Tabela 2: Países com maior capacidade instalada acumulada e geração distribuída, em GW.	14
Tabela 3: Número total de pedidos internacionais depositados e publicados entre 2002 e 2019.	17
Tabela 4: Número de pedidos publicados em energias renováveis de 2002 a 2009.	19
Tabela 5: Número de pedidos publicados em energias renováveis por país de 2010 a 2019.	20
Tabela 6: Número de patentes publicadas relacionadas à tecnologia solar fotovoltaica por empresas.	21
Tabela 7: Capacidade acumulada projetada de painéis fotovoltaicos no mundo.	27
Tabela 8: Principais constituintes dos painéis solares de silício policristalino e monocristalino.	35
Tabela 9: Resposta dos filtros de pesquisa durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.	63
Tabela 10: Resposta dos filtros de pesquisa durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABSOLAR Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
- ACL Ambiente de Comercialização Livre
- ACR Ambiente de Comercialização Regulada
- ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica
- APE Autoprodutores de Energia Elétrica
- CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
- CdTe Telureto de Cádmio
- COP28 28^a Conferência das Partes sobre Mudança do Clima das Nações Unidas
- c-Si Silício Cristalino
- IEA *International Energy Agency*
- EPE Empresa de Pesquisa Energética
- IPC International Patent Classification
- IRENA Agência Internacional de Energias Renováveis
- MMGD Microgeração e o da Minigeração Distribuída
- NBR Norma Brasileira Regulamentadora
- ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PD&I Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
- PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos
- PV Painel Fotovoltaico
- UFPR Universidade Federal do Paraná
- UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro
- WIPO *World Intellectual Property Organization*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO	3
2. ENERGIA FOTOVOLTAICA	4
2.1 HISTÓRICO	4
2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	5
2.2.1 Silício	6
2.2.2 Telureto de Cádmio	7
2.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	9
3. PANORAMA GLOBAL DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	13
3.1 PROJEÇÃO PARA O FUTURO	24
3.2 CENÁRIO NACIONAL	27
4. DESCARTE E RECICLAGEM DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	34
4.1 CENTROS DE RECICLAGEM	35
4.1.1 Aproveitamento dos Painéis Solares	39
4.2 PROJETOS NO BRASIL	42
4.3 PROJEÇÃO DE RESÍDUOS	46
5. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	49
5.1 ROADMAP TECNOLÓGICO	49
5.2 METODOLOGIA DE PROSPECÇÃO	51
5.3 RECRUTAMENTO DE INFORMAÇÕES	52
5.3.1 Artigos Científicos	53
5.3.2 Patentes	53
5.3.3 Níveis de Análise	54

5.3.4 Prospecção de Artigos Científicos	55
5.3.5 Prospecção de Patentes Depositadas	62
5.3.6 Prospecção de Patentes Concedidas	66
5.4 ELABORAÇÃO DO ROADMAP TECNOLÓGICO	70
5.4.1 Taxonomias	71
5.4.2 Roadmap Tecnológico Completo	74
5.4.3 Estágio Atual	76
5.4.4 Curto Prazo	77
5.4.5 Médio Prazo	78
5.4.6 Longo Prazo	80
5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
6. CONCLUSÕES	84
6.1 CONCLUSÕES GERAIS	84
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

A demanda pelo aumento de produção energética é uma realidade fator mundial, seja pelo crescimento da população ou pela tentativa ininterrupta de um desenvolvimento socioeconômico. Como consequência disso, principalmente nos países mais desenvolvidos, existe um imenso apelo a fim de mitigar os impactos obtidos a partir da emissão de dióxido de carbono (CO₂) que surge principalmente da queima de combustíveis fósseis, embora seja sabido que a agropecuária é a principal fonte de emissão de gás metano. Dito isso, o surgimento de novas tecnologias voltadas à produção de energia limpa e, sobretudo, renováveis, é uma necessidade urgente. Dentre as fontes de energia limpa, destacam-se a eólica, o hidrogênio verde, o etanol, o biodiesel, e a fotovoltaica.

Em uma perspectiva global, existem diversas fontes de energia, cada uma delas adaptada às condições climáticas, geográficas e socioeconômicas de diferentes países. O Brasil, por exemplo, segundo informações da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), possui um diferencial significativo na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. De acordo com a empresa, em 2018, o Brasil obteve 83% de seu consumo de eletricidade oriundo dessas fontes, enquanto a média mundial foi de apenas 25%. Contudo, é importante destacar que uma parcela significativa dessa energia é gerada por usinas hidrelétricas, que, apesar de serem classificadas como fontes renováveis, podem causar prejuízos consideráveis a seu entorno. Isso se deve ao fato de que tais instalações requerem vastas áreas, o que pode acarretar problemas ambientais, como a devastação da vegetação, além de questões sociais, especialmente quando comunidades precisam ser deslocadas para viabilizar esses projetos.

A fim de atenuar esses problemas, diversas iniciativas estão constantemente surgindo com o objetivo de substituir a matriz elétrica atual por opções que causem menos impactos ambientais e socioeconômicos. Nesse contexto, a energia fotovoltaica, que ainda apresenta uma geração de eletricidade relativamente baixa no Brasil, é considerada uma das grandes promessas para essa transição.

O Brasil possui uma significativa vantagem na adoção da fonte de energia fotovoltaica, uma vez que a irradiação diária varia entre 4,8 e 6,0 kWh/m². Em contrapartida, até 2016 a Alemanha, que liderava o uso de energia fotovoltaica, não chegava a 3,2 kWh/m² de irradiação diária, evidenciando que o Brasil está longe de explorar plenamente seu potencial de produção (COMERC, 2016).

Dentre as várias vantagens que existem no processo de geração de energia fotovoltaica, pode-se destacar que é uma energia que ao longo dos anos torna-se menos custosa ao consumidor final, mesmo quando instalado em residências. Além disso, destaca-se também o aspecto positivo por essa energia ser considerada uma energia limpa e renovável. Pelo fato de questões ambientais terem entrado como pauta em todo o mundo nos últimos anos, analisar os processos de produção e descarte de células fotovoltaicas torna-se necessário uma vez que o grave processo de degradação do planeta se encontra em um patamar praticamente irreversível, tornando-se urgente os processos de produção e descarte cada vez mais sustentáveis.

Dito isso, este trabalho se propõe a analisar o panorama mundial da energia elétrica gerada por células fotovoltaicas. Desse modo, foi feito um estudo de prospecção tecnológica para compreender o estado da arte das tecnologias envolvidas no setor de células fotovoltaicas, as áreas que mais carecem de pesquisa e que são as mais exploradas, resultando na elaboração de um Roadmap Tecnológico (BORSCHIVER; LEMOS, 2016).

Durante a elaboração do estudo, foram analisados diversos documentos técnicos, artigos científicos, patentes depositadas e concedidas, em um horizonte temporal definido, além de sites de empresas e relatórios. A prospecção foi realizada de maneira que fosse elaborado um Roadmap Tecnológico, que é um documento visual, em forma de mapa, que reconhece os principais *players* envolvidos e os parâmetros-chave do mercado, do produto e da tecnologia ao longo do tempo, atuando como uma ferramenta de tomada de decisão. Assim, é possível identificar janelas de oportunidade e estudar os melhores focos para alocação de investimentos (BORSCHIVER; LEMOS, 2016).

Embora as vantagens dessa matriz energética sejam consideradas maiores se comparadas a outras matrizes, suas desvantagens, as quais contam com ínfimos estudos que permeiam a temática, não deixam de ser significativas, principalmente no âmbito do descarte final do produto após o uso (COELHO; SERRA, 2018). Diante desse ponto de vista, o tema em estudo também se destaca por sua interdisciplinaridade, pois envolve os setores estratégicos de energias renováveis e de gerenciamento de resíduos. Portanto, a visualização do comportamento do mercado mundial frente a essa tecnologia e a identificação dos principais *players* envolvidos em diferentes faixas temporais podem ajudar órgãos nacionais e internacionais a direcionarem projetos futuros nessa área.

1.1 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é analisar o direcionamento do desenvolvimento tecnológico mundial da utilização de células fotovoltaicas em horizonte temporal definido por meio da ferramenta de Roadmap Tecnológico.

2. ENERGIA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica é o dispositivo elétrico responsável por converter a energia da luz do sol diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Para isso, as células fotovoltaicas são produzidas a partir de materiais semicondutores, os quais podem ser de diferentes tipos (BRITO, 2006).

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, que são classificadas pelo material e refinamento usados. Os principais tipos de células fotovoltaicas são produzidos em silício cristalizado, podendo ser monocristalino (mono-Si) ou policristalino (multi-Si) (BRITO, 2006).

Para fabricar placas solares, são utilizadas várias células solares interligadas em série. As placas são conhecidas como módulos fotovoltaicos, e o conjunto deles forma o painel solar. Como as células são as responsáveis por converter a luz do sol em energia elétrica (energia solar fotovoltaica), quanto mais células um módulo fotovoltaico possuir, mais energia ele será capaz de gerar.

A energia solar é renovável, limpa e silenciosa; pode ser usada em áreas isoladas da rede elétrica, havendo necessidade mínima de manutenção, sendo de fácil instalação e barata manutenção (PORTALSOLAR, 2023).

2.1 HISTÓRICO

O efeito fotovoltaico foi reportado inicialmente por Edmund Becquerel, em 1839, que observou que a ação da luz em um eletrodo de platina recoberto com prata imerso em um eletrólito produzia corrente elétrica. Quarenta anos mais tarde, os primeiros dispositivos fotovoltaicos em estado sólido foram construídos por pesquisadores que investigavam a fotocondutividade do selênio. Somente em 1954 a primeira célula solar de silício foi reportada por Chapin, Fuller e Pearson, cuja eficiência de conversão era de 6%. A partir de então, trabalhou-se na obtenção de um sistema realizável e de longa duração para sistemas de alimentação de satélites. (GOETZBERGER, 2003; NELSON, 2003).

A utilização de fotocélulas teve papel decisivo para os programas espaciais. Com esse impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica, de modo que se aprimorou o processo de fabricação, melhorando a eficiência das células e seu peso. Com a crise mundial de energia de 1973-1974, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente aos programas

espaciais, mas que fosse intensamente estudada e utilizada no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia (BRITO, 2006).

A eletricidade solar fotovoltaica é considerada uma tecnologia energética promissora. As células solares convertem diretamente a energia solar, a mais abundante fonte de energia renovável no planeta Terra em eletricidade. O processo de geração, executado por dispositivos semicondutores, não tem partes móveis, não produz cinzas nem outros resíduos e, por não liberar calor residual, não altera o equilíbrio da biosfera. Além disso, como não envolve queima de combustíveis, evita grande parte do efeito estufa (BRAGA, 2008).

2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula solar é a unidade básica de um bloco fotovoltaico. Ela pode ser considerada como um dispositivo de dois terminais, que conduz como um diodo quando célula não excitada por luz, ou que gera uma diferença de potencial quando sob luz. A célula é, usualmente, uma fina camada de material semicondutor de cerca de 100 cm^2 de área. A superfície é tratada para que o mínimo de luz visível seja refletido, portanto possui aparência escura. Uma rede de contatos metálicos é impressa na superfície para fazer contato elétrico (DIENSTMANN, 2009).

A Figura 1 apresenta a célula fotovoltaica, módulo fotovoltaico e painel ou arranjo fotovoltaico.

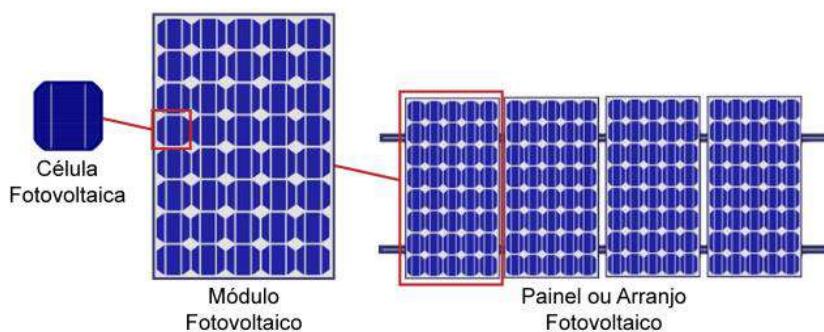


Figura 1: Esquema de célula fotovoltaica, módulo fotovoltaico e painel ou arranjo fotovoltaico. Fonte: PORTALSOLAR, 2023.

Em 1993, a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, sendo o silício quase absoluto no ranking dos materiais utilizados. No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que

apresentam estruturas cristalinas requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação (BRITO, 2006).

Assim, o silício (Si) é o principal material na fabricação das células fotovoltaicas (FV), e se constitui como o segundo elemento químico mais abundante na terra. O silício tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo (CEMIG, 2012). Quase 80% dos painéis fotovoltaicos no mundo são baseados em alguma variação de silício. Em 2014, cerca de 85% de todos os sistemas de energia solar fotovoltaica instalados em casas e empresas no mundo todo utilizam alguma tecnologia baseada em silício (Si) (PORTALSOLAR, 2016).

2.2.1 Silício

A maioria dos módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, também denominados de células, são obtidos a partir de fatias de um único grande cristal, mergulhados em silício fundido. Neste processo, o cristal recebe pequenas quantidades de boro formando um semicondutor dopado do tipo “p” (dopados com átomos que contêm três elétrons em sua última camada). A esse semicondutor, após seu corte, é introduzido impurezas do tipo “n” (as impurezas possuem banda de valência com valores de gap de energia inferiores àquele do material puro, por isso são doadoras), expostas a vapor de fósforo em fornos com altas temperaturas, garantindo confiabilidade e eficiência aos produtos (LANA et al., 2016).

Os módulos solares de silício monocristalino (mono-Si) são facilmente reconhecíveis em função de suas características típicas, especialmente cor uniforme, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados

Ambos módulos, mono e poli cristalino, são feitos de silício, a principal diferença entre as tecnologias é o método utilizado na fundição dos cristais. No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, dessa forma preservando a formação de múltiplos cristais; por isso, o nome policristalino. Quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar a formação múltipla de cristais (PORTALSOLAR, 2016).

Para Ruther (1999, 2000, 2011), a eficiência do módulo fotovoltaico policristalino (p-Si) é menor que a do silício monocristalino, mesmo sendo fabricados pelo mesmo material. Isso, pois, ao invés de ser formado por um único cristal, é fundido e solidificado, resultando em um bloco com grandes quantidades de grãos ou cristais, concentrando maior número de defeitos. Em função disso, o seu custo é mais baixo quando comparado às células monocristalinas.

Ademais, os módulos de silício amorfo (a-Si) apresentam geralmente uma cor sólida entre o azul e o preto, outras cores também podem ser produzidas, mas representam uma perda de eficiência. Isso porque outras tonalidades derivam da reflexão de parte da luz incidente, por exemplo, um módulo dourado teria uma perda de 20% de eficiência (THOMAS; GRAINER, 1999). A eficiência dos módulos de a-Si no mercado encontra-se na ordem de 5 a 9%, e seu grande potencial é a facilidade de integração com os elementos construídos (SANTOS, 2009).

Por outro lado, a utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo (BRITO, 2006).

A comparação visual entre as células fotovoltaicas compostas por silício amorfo, policristalino e monocristalino pode ser vista na Figura 2.



Figura 2: Comparação visual de células fotovoltaicas compostas por silício amorfo, policristalino e monocristalino. Fonte: AUTOSOLAR, 2023.

2.2.2 Telureto de Cádmio

O filme de telureto de cádmio (CdTe) é um dos vários semicondutores usados para células solares. Apesar disso, para alcançar as eficiências e os baixos custos requeridos para competir com as tecnologias mais tradicionais, como as células de silício, ainda são necessárias várias melhorias em seu desempenho (MOUTINHO et al., 2000).

As técnicas de deposição usadas para obter eficiências acima de 10% em células pequenas são eletrodeposição, sublimação em espaço reduzido, spray químico e epitaxia da camada atômica (ALE). Os materiais brutos, Cd e Te, são relativamente baratos e disponíveis

em quantidades razoáveis. Entretanto, o cádmio é classificado como um material prejudicial ao meio ambiente (BONNET, 2000).

A conversão de energia solar com semicondutores engloba a utilização de uma junção p-n. O campo elétrico da junção é responsável por separar os portadores de carga gerados pela absorção da luz dentro do material semicondutor. Ao formar a junção p-n (também conhecida como a junção principal em uma célula solar), o CdTe preenche o papel do material tipo p. Todas as células solares que envolvem CdTe como material ativo contêm um semicondutor tipo n altamente transparente que induz uma região de depleção no filme de CdTe semicondutor tipo p. Esse contato pode ser feito a partir de um metal ou um condutor transparente ou um semicondutor altamente dopado tal como CdS ou ZnO. A combinação mais comum é p-CdTe/n-CdS; assim, para completar a junção, o CdS é utilizado como camada tipo-n (WU et al., 2001).

O CdS ($E_g=2,5\text{eV}$) permite que uma grande faixa de comprimentos de onda seja transmitida através dele e entre no CdTe, a camada de absorção. Por agir como um filtro para a luz solar, a camada de CdS é conhecida por camada de janela (TOWNSEND, 2001).

Ao depositar camadas de filme fino, no caso de células de CdS/CdTe, a ordem de empilhamento pode ser alterada. Se a luz incidir no material de maior banda de energia (exemplo, CdS), a célula será do tipo “backwall”. Do contrário, a luz incidente no material de menor banda de energia, a célula é chamada do tipo “frontwall”. As propriedades dos filmes são diferentes dependendo se foram crescidos sobre um substrato neutro tal como um vidro recoberto com um filme de contato metálico ou sobre um filme de CdS de uma dada estrutura cristalina e morfologia. Assim, uma diferença foi observada entre os contatos ôhmicos ao depositar CdTe sobre o material de contato ou ao depositar o material de contato sobre o CdTe. A sequência de filmes normalmente utilizada na célula solar a filme fino CdS/CdTe é a “backwall”, apresentada na Figura 3, considerada geralmente a melhor alternativa (TOWNSEND, 2001).

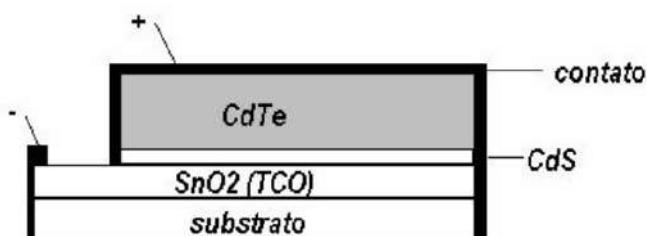


Figura 3: Sequência de filmes normalmente utilizada na célula solar a filme fino CdS/CdTe (“backwall”). Fonte: Adaptado de TOWNSEND, 2001.

Embora os painéis solares cristalinos sejam mais eficientes do que o CdTe, tornando-os melhores para os mercados residenciais, isso não significa que sejam mais adequados para todos os tipos de instalações (ROSCHEIER, 2002). Em algumas aplicações industriais em clima quente, as fazendas solares com painéis de CdTe podem ter o potencial de fornecer uma saída de energia mais alta do que os painéis solares de silício cristalino, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre painéis de silício cristalino e painéis CdTe.

	Painel de Silício Cristalino	Painel CdTe
Tipo de tecnologia	<ul style="list-style-type: none"> • Silício monocristalino (c-Si) • Silício amorfo (a-Si) • Silício policristalino (pc-Si) 	Telureto de Cádmio (CdTe)
Coeficiente de temperatura	-0.446% / °C a -0.387% / °C	-0.172% / °C
Eficiência	20% -25%	19%
Compatibilidade com inversores	A maioria dos inversores do mercado é projetada para o coeficiente de baixa temperatura desses painéis	Os instaladores devem considerar as temperaturas no local de instalação em relação ao coeficiente de temperatura
Espaço Requerido	Requisitos padrão	Requer até 31% mais espaço por kW instalado
Faixa de preço	US\$ 0.70 a US\$ 1.50/Watt	US\$ 0.46/Watt
Aplicações	Residencial/Comercial/Industrial	Comercial/Industrial

Fonte: PORTALSOLAR, 2016.

2.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados em três tipos: os sistemas isolados (off-grid), conectados à rede (on-grid) e os sistemas híbridos. Os sistemas fotovoltaicos off-grid são sistemas que não dependem da rede elétrica convencional para funcionar e funcionam de forma autônoma, sendo possível sua utilização em localidades carentes de rede de distribuição elétrica, como as zonas rurais. Existem dois tipos de sistemas autônomos: com armazenamento e sem armazenamento. O primeiro pode ser utilizado em carregamento de baterias de veículos elétricos, em iluminação pública, nos satélites que estão em órbita e, até mesmo, em pequenos aparelhos portáteis (VILLALVA; GAZOLI, 2012), conforme mostrado na Figura 4. Enquanto o segundo, além de ser frequentemente utilizado em bombeamento de

água, apresenta maior viabilidade econômica, já que não utiliza instrumentos para o armazenamento de energia (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011), como é mostrado na Figura 5.



Figura 4: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos off-grid sem armazenamento. Fonte: NEOSOLAR, 2022.

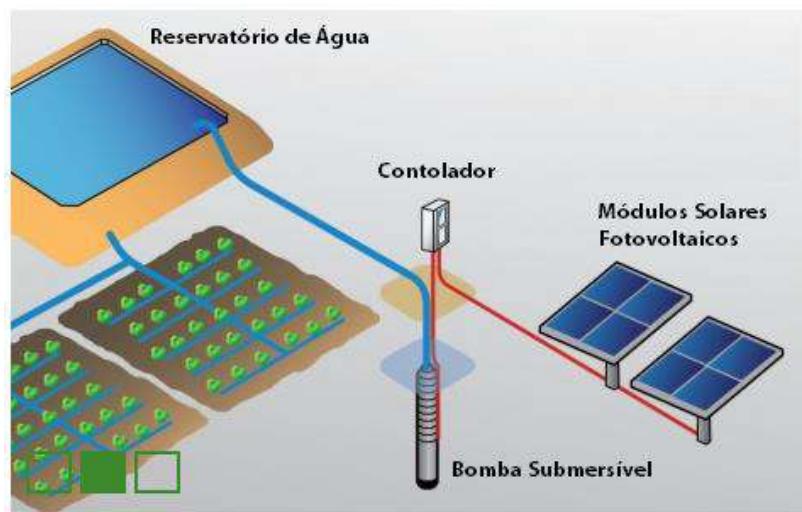


Figura 5: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos off-grid com armazenamento. Fonte: TÉCNICA VIÇOSA, 2022.

Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos on-grid são aqueles que trabalham em paralelo com a rede elétrica da distribuidora de energia. De forma sucinta, o módulo fotovoltaico gera energia elétrica em corrente contínua e, após convertê-la para corrente alternada, é injetada na rede de energia elétrica. Essa conversão se dá pela utilização do inversor de frequência, que realiza a interface entre o painel e a rede elétrica (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011). Nesse sistema, a rede elétrica da distribuidora de energia fornece energia elétrica quando a geração fotovoltaica

for inferior ao consumo, como por exemplo durante à noite. Dessa forma, os sistemas on-grid são dispensados do uso do banco de baterias. Quando a potência gerada for superior à potência solicitada pela carga, o excedente é injetado na rede de distribuição para fornecer energia complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado (PINHO; GALDINO, 2014). Na Figura 6, encontra-se uma representação de um sistema fotovoltaico on-grid.

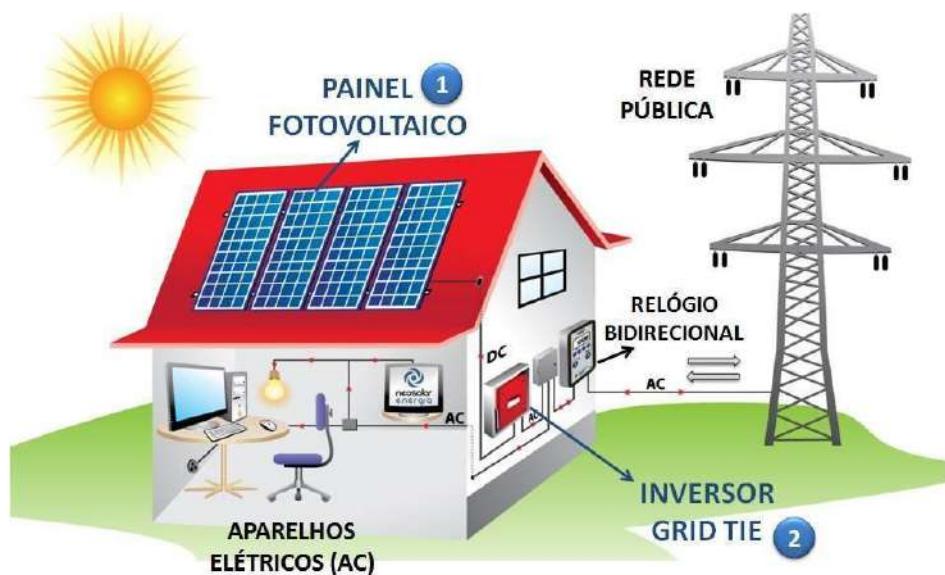


Figura 6: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos on-grid. Fonte: NEOSOLAR, 2022.

Por fim tem-se os sistemas híbridos que são sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede elétrica (similar ao sistema fotovoltaico conectado à rede on-grid) integrado com um sistema de armazenamento de energia inteligente (similar ao sistema fotovoltaico autônomo off-grid), que geram além da economia de energia uma maior confiabilidade para cargas prioritárias e autonomia conforme banco de bateria ou fonte de energia secundária, diferente do sistema fotovoltaico tradicional, que não opera com uma queda de energia da rede local. A Figura 7 representa a composição de um sistema fotovoltaico híbrido.



Figura 7: Esquema de sistemas solares fotovoltaicos híbridos. Fonte: OCA SOLAR ENERGIA, 2022.

3. PANORAMA GLOBAL DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Com o aumento da utilização do carvão, que acompanhou a Revolução Industrial, o consumo de energia tem transitado da madeira e biomassa até combustíveis fósseis. O desenvolvimento precoce de tecnologias solares a partir na década de 1860 foi impulsionado por uma expectativa de que o carvão viria a se tornar escasso. No entanto, o desenvolvimento de tecnologias solares estagnou no início do século XX em face do aumento da disponibilidade, economia e utilidade do carvão e do petróleo.

A crise do petróleo nos anos 1970 causou uma reorganização das políticas energéticas de todo o mundo e trouxe uma renovada atenção ao desenvolvimento de tecnologias solares. As estratégias de implantação focaram em programas de incentivo, como o Programa de Aproveitamento Federal Fotovoltaico, nos Estados Unidos, e o Programa Luz do Sol, no Japão. Outros esforços incluíram a formação de centros de pesquisa nos Estados Unidos (SERI, agora NREL), Japão (NEDO) e Alemanha (Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar).

Aquecedores de água solares comerciais começaram a aparecer nos Estados Unidos na década de 1890. Estes sistemas tiveram um uso crescente até 1920, mas foram gradualmente substituídos por combustíveis fósseis, mais baratos e mais confiáveis. Tal como acontece com a energia fotovoltaica, o aquecimento solar de água também atraiu atenção renovada como resultado das crises do petróleo na década de 1970, mas o interesse abrandou na década de 1980, devido à queda dos preços do petróleo. O desenvolvimento do setor de aquecimento solar de água progrediu de forma constante ao longo dos anos 1990, com taxas de crescimento que foram em média de 20% ao ano desde 1999. Embora geralmente subestimado, o aquecimento solar de água e refrigeração é, de longe, a tecnologia solar mais amplamente difundida, com uma capacidade estimada de 154 GW em 2007 (PORTALSOLAR, 2023).

A capacidade de produção de energia solar no mundo já supera 1 TW de instalações fotovoltaicas cumulativas, especialmente em sistemas conectados à rede (on-grid) nos últimos anos. Com isso, os principais países que utilizam a tecnologia como fonte de energia são representados na Tabela 2.

Tabela 2: Países com maior capacidade instalada acumulada e geração distribuída, em GW.

País	Capacidade instalada acumulada	Geração distribuída (sistema on-grid)
	(GW)	(GW)
China	609,3	392
EUA	137,7	111
Japão	87,1	78,8
Alemanha	81,7	66,5
Índia	72,7	62,8
Brasil	37,4	25,8
Austrália	33,6	26,7
Itália	29,8	25

Fonte: CNN, 2024.

A China é uma das maiores consumidoras e produtoras de energia solar no mundo. O país tem o compromisso de utilizar 35% de combustíveis não-fósseis em sua matriz elétrica, a fim de minimizar os impactos de atividades industriais, comerciais e domésticas na natureza. Os custos para o uso da energia solar na China são menores, se comparado com outros países. Isso se dá porque existem incentivos governamentais à adoção desse sistema. O país conta com mais de 400 empresas do tipo em operação (PORTALSOLAR, 2023).

Por ser a maior fabricante de painéis solares do mundo, a China também conta com a maior usina solar já construída, com capacidade de produzir 1.500 MW. Números apontam que a China é responsável por consumir mais de 50% da produção de placas solares do mundo inteiro, o que coloca o país no caminho certo para a independência energética (IRENA, 2016).

Os Estados Unidos já possuem um mercado consolidado em geração distribuída, o que pode ser verificado a partir da sua capacidade instalada acumulada. Em 2006, foi instaurado o programa no estado da Califórnia chamado “Million Solar Roofs Plan”, objetivando a instalação de sistemas fotovoltaicos em um milhão de telhados. Esse totalizou 18 GW de potência até 2018. Em seguida, no ano de 2008, o Departamento de Energia do governo estadunidense anunciou o investimento de US\$17,6 milhões em seis companhias de energia. Assim, tornou-se a energia fotovoltaica competitiva através do desenvolvimento tecnológico (IEA, 2019).

Além disso, incentivos fiscais e financiamentos foram implementados em 40 estados, expandindo o sistema de compensação de energia, o chamado “net metering”. As taxas de financiamentos que se tornaram mais baixas para sistemas fotovoltaicos e deduções de impostos estão entre as políticas de incentivo que foram aplicadas pelo governo para o desenvolvimento da fonte. Por conta do crescimento constante da distribuição de energia solar no mundo, segundo a IEA (International Energy Agency), estima-se que, em 2022, o uso da fonte alternativa representava 30% da energia elétrica do país. Para os consumidores, novos produtos estão popularizando-se em formatos de PPA ou leasing, possibilitando aos clientes economia imediata através da energia solar, chamada “savings from day one”.

O Japão é o terceiro maior mercado de energia solar do mundo, com mais de 80 GW de capacidade instalada. Em 1994, o governo instituiu o programa de incentivo ao uso de painéis solares, o que representou a instalação de 70 mil telhados solares. Além do investimento de US\$ 457 milhões no programa, foram implementados redução fiscal para a indústria solar e subsídios para o financiamento de energia solar (IEA, 2019).

Em 2013, o Japão atingiu uma potência instalada de 6.707 MW, incentivando toda a população a adotar o uso de energia solar em suas residências. No ano seguinte, tornou-se o segundo maior no mercado mundial, atingindo o recorde de 6,97 GW e 9,74 GW de potência instalada. Em 2019, o país expandiu seus empreendimentos, criando a primeira usina solar no Brasil, com 1,3 GW de potência instalada (IEA, 2019).

A consolidação da Alemanha como uma das principais nações com capacidade acumulada instalada deve-se aos programas de fomento à geração de energia solar fotovoltaica mundial criados pelo governo alemão. Em 1991, a Lei Feed-in-Law foi instituída, a qual deu início a venda de energia provinda de geração distribuída. Essa lei prevê que a concessionária é obrigada a comprar a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos, pagando em forma de créditos energéticos por essa energia (IEA, 2019).

Ainda na década de 1990, houve a instalação de 1 mil telhados fotovoltaicos oferecendo uma subvenção de 70% do custo inicial para a instalação do projeto. Em 1999, o governo criou o "100.000 Roofs Solar Programme", um programa cujo objetivo era a instalação de 100 mil telhados solares, contando com financiamento de 0% de juros e 10 anos para o financiamento (IEA, 2019).

Em 2000, foi aprovada a Lei Obrigatória, a qual as companhias elétricas devem pagar, em dinheiro, aos consumidores que devolvem o excedente de energia gerada nos sistemas de microgeração, como créditos energéticos. Contudo, já em 2018, o país continuou voltado para a diminuição da emissão de CO₂, estando 32% abaixo dos níveis do ano de 1990, estimando-se 40% em redução. No início de 2020, a Alemanha produzia em torno de 35% da sua eletricidade a partir de fontes de energia renováveis, mirando atingir 100% de energia limpa e inesgotável em utilização até 2050 (PORTALSOLAR, 2023).

Desde 2015, a Índia investe em práticas de utilização da energia solar para substituir sua principal fonte energética atual, o carvão. Desde então, o país figura entre os que mais investem em energia renovável. Seu objetivo é que, até 2030, o país seja responsável pela produção de 100 Gigawatts de energia fotovoltaica (ALDOSOLAR, 2023).

Portanto, os subsídios do governo indiano para compra e instalação de sistemas de energia solar torna a energia solar um negócio muito lucrativo para o mercado indiano. Em 2023, o país contava com 72 GW instalados, número que cresce a cada ano. O futuro para a energia solar no país, portanto, é realmente promissor.

A capacidade instalada acumulada de energia solar em GW por país pode ser vista na Figura 8.

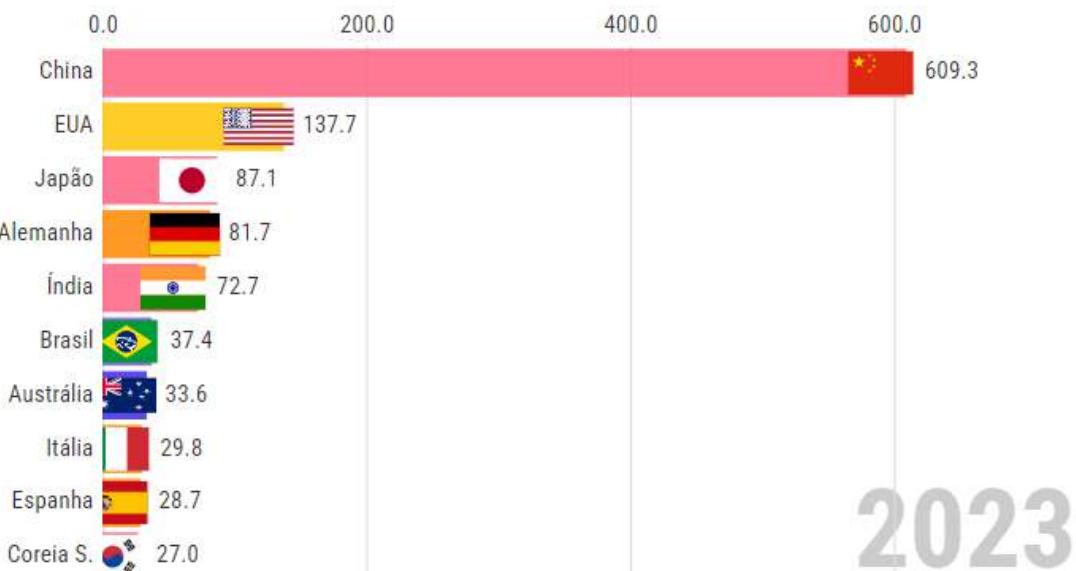


Figura 8: Capacidade instalada acumulada de energia solar em GW. Fonte: CNN, 2024.

Em 2011, um relatório da Agência Internacional de Energia (AIE) descobriu que tecnologias de energia solar, tais como a energia fotovoltaica, o aquecimento de água e a energia

solar concentrada, poderiam fornecer um terço da energia do mundo até 2060 se os países se comprometessem a limitar as alterações climáticas. A energia solar pode desempenhar um papel-chave na descarbonização da economia global e trazer melhorias na eficiência energética, além de impor custos sobre emissores de gases de efeito estufa.

Tendo em vista o crescimento do uso de energias renováveis, o número total de pedidos internacionais depositados e publicados na Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI; em inglês, World Intellectual Property Organization, WIPO) para tecnologias renováveis aumentou entre 2002 e 2012, quando atingiu o pico de 4.541 (WIPO, 2019). Desde então, o número de pedidos diminuiu todos os anos entre 2013 e 2018, embora os números tenham aumentado ligeiramente em 2019, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Número total de pedidos internacionais depositados e publicados entre 2002 e 2019.

Ano	Documentos publicados
2002	831
2003	1,084
2004	1,123
2005	1,464
2006	1,701
2007	2,048
2008	2,575
2009	3,090
2010	3,662
2011	4,272
2012	4,541
2013	4,308
2014	3,556
2015	2,752
2016	2,477
2017	2,606
2018	2,689
2019	2,863

Fonte: WIPO.

Para contextualizar esses dados, 237.378 pedidos foram publicados pela WIPO em todas as tecnologias em 2018, o que significa que a proporção de patentes para energias renováveis foi pouco superior a 1%. Esse valor é pequeno em comparação com áreas como a tecnologia informática, a comunicação digital, a tecnologia médica e a farmacêutica, cada uma das quais representa pelo menos 6% das aplicações internacionais (WIPO, 2019).

Contudo, a taxa de crescimento das energias renováveis é impressionante: de 2002 a 2012, o número de pedidos de patentes publicados para energias renováveis aumentou 547%, o que demonstra que essa década foi a que atraiu maior número de investimento no setor e que mais se promoveu a inovação. E, embora o número total de publicações tenha diminuído desde o pico de 2012, em 2019 ainda era 3,5 vezes superior ao de 2002 (WIPO, 2019).

Uma outra forma de medir tendências é observar as famílias de patentes. Uma família de patentes inclui todas as patentes nacionais e regionais com a mesma data de prioridade; ou seja, ajuda a medir tanto o número de inovações como o número de mercados em que são apresentadas. Usando esse conceito, o número total de pedidos de patentes relacionados com energias renováveis, com base no ano de depósito do primeiro pedido listado, aumentou de 10.463 em 2002 para um pico de 27.089 em 2011. Em 2017 (ano mais recente para o qual há dados disponíveis), o número era 24.027 (WIPO, 2019).

A tendência mais notável desde 2002 é o crescimento da tecnologia solar, como pode ser visto na Tabela 4. Em 2002, a energia solar representou pouco mais de um quarto dos pedidos publicados para energias renováveis, enquanto, em 2019, representou mais da metade deles.

Tabela 4: Número de pedidos publicados em energias renováveis de 2002 a 2019.

Ano	Solar	Célula	Eólica	Geotérmica
2002	218	488	120	5
2003	239	640	194	11
2004	252	696	170	5
2005	403	902	148	11
2006	526	971	193	11
2007	722	1,045	263	18
2008	997	1,173	385	20
2009	1,536	976	530	48
2010	2,026	834	767	35
2011	2,522	854	848	48
2012	2,691	883	914	53
2013	2,465	921	875	47
2014	1,846	949	714	47
2015	1,290	819	608	35
2016	1,296	647	508	26
2017	1,374	577	619	36
2018	1,363	571	713	42
2019	1,479	537	807	40

Fonte: WIPO.

Nos últimos 20 anos, o número de pedidos publicados relacionados à energia solar aumentou 678%. A solar tem sido a tecnologia líder todos os anos desde 2009 e atingiu o seu pico em 2012, quando foram publicados 2.691 pedidos de patentes internacionais. Esse investimento em inovação reflete o crescimento da produção de energia solar em todo o mundo: apenas 25 Gigawatts (GW) de capacidade solar no final de 2009. No período de 2010 a 2019, um adicional 638 GW foram instalados e estavam disponíveis para geração de energia (IEA, 2019). Os resultados dos números de pedidos publicados podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5: Número de pedidos publicados em energias renováveis por país de 2010 a 2019.

País	Total	Solar	Célula	Eólica	Geotérmica
Japão	9,394	5,360	3,292	702	40
EUA	6,300	3,876	1,391	927	106
Alemanha	3,684	1,534	813	1,309	28
Coreia do Sul	2,695	1,803	506	360	26
China	2,659	1,892	189	555	23
Dinamarca	1,495	52	81	1,358	4
França	1,226	660	348	184	34
Inglaterra	709	208	271	218	12
Espanha	678	341	29	300	8
Itália	509	316	57	123	13

Fonte: WIPO.

Com base nessa análise, ao longo da década de 2010 a 2019, o Japão lidera o quadro de líderes no que diz respeito ao número total de pedidos de patentes para energias renováveis em geral, e para tecnologias solares e de células de combustível. Os Estados Unidos estão em primeiro lugar em tecnologia geotérmica. Para energia eólica, a Dinamarca está em primeiro lugar, seguida pela Alemanha.

Contudo, durante a segunda metade da década, o cenário é um pouco diferente. Enquanto o Japão ainda lidera com um total de 3.114 pedidos de patentes internacionais publicados para energias renováveis, e os Estados Unidos permanecem em segundo lugar com 2.247, a China subiu para o terceiro lugar com 1.522. Do número total de pedidos publicados da China, 1.115 são no campo da tecnologia solar, onde a China fez grandes avanços nos últimos anos: em 2017, a China tornou-se o primeiro país a ultrapassar 100 GW de capacidade solar. O seu objetivo é atingir 1.330 GW até 2050 (WIPO, 2019).

A China também está confortavelmente classificada em primeiro lugar quando são analisadas as famílias de patentes. No período de 2013 a 2017, por exemplo, contando famílias inteiras de patentes, 45.472 patentes tiveram origem na China, mais que o dobro do número originado no Japão, que ocupa o segundo lugar (21.386). A tendência é impulsionada pela

tecnologia solar, onde os requerentes chineses têm três vezes mais patentes em comparação com os do Japão (WIPO, 2019).

O contraste entre os dados sobre patentes publicadas e famílias de patentes é interessante, pois indica que os requerentes da China estão solicitando patentes em mais jurisdições em comparação com os de outras regiões. Isso, por sua vez, sugere que a China pode considerar os seus produtos como tendo potencial para serem comercializados mundialmente (WIPO, 2019).

De acordo com o Energy Monitor, estas são as 10 principais empresas listadas como cessionárias de publicações de patentes relacionadas à tecnologia solar fotovoltaica:

Tabela 6: Número de patentes publicadas relacionadas à tecnologia solar fotovoltaica por empresas entre 2002 e 2019.

Empresa	País	Patentes publicadas
Grupo Mitsubishi	Japão	7.711
Panasonic	Japão	7.374
Grupo Samsung	Coreia do Sul	6.407
Sharp	Japão	5.785
E. Merck	Alemanha	4.654
LG	Coreia do Sul	4.132
SunPower	Estados Unidos	3.760
Canon	Japão	3.739
LG Display	Coreia do Sul	3.605

Fonte: WIPO.

Notavelmente, apesar do recente crescimento e dos investimentos da China nesse campo, não há nenhuma empresa chinesa nessa lista.

Apesar de não possuir nenhuma empresa listada como cessionárias de publicações de patentes relacionadas à tecnologia solar fotovoltaica, a China está se consolidando com a produção de tecnologias solares em grande escala: a China controla atualmente o fabrico de mais de 80% de todos os componentes dos painéis solares (IEA, 2019).

Segundo a InfoLink Consulting (2023), estima-se que, em 2023, a China exportou 208 GW em painéis solares. O levantamento aponta que, apesar da alta nos estoques em diversos mercados, as compras foram sustentadas no quarto trimestre em níveis similares aos anteriores.

No final do ano de 2023, com a baixa sazonalidade na Europa e Estados Unidos, Índia e Brasil se tornaram os principais polos de importação global.

Depois da Europa, o Brasil é o segundo maior importador de painéis solares da China e trouxe ao país cerca de 9,5 GW no primeiro semestre de 2023. Essa quantidade é similar à do mesmo período de 2022, ou seja, 9,4 GW. Esses dados foram extraídos de uma análise realizada pelo *think tank* de energia Ember. O estudo revelou, também, que houve um crescimento de 34% nas exportações de módulos da China no primeiro semestre de 2023. Dessa forma, 114 GW foram enviados para o mundo todo, comparando-se aos 85 GW enviados durante o mesmo período em 2022.

Segundo resultados do estudo, o maior crescimento absoluto ficou com a Europa. Já a África teve o maior aumento percentual, figurando entre as porcentagens de crescimento mais rápido, ao lado do Oriente Médio. Contudo, por possuir o maior número de exportações, o avanço das exportações de células fotovoltaicas e painéis solares por parte da China implica em consequências mundiais para expandir a energia limpa (EMBER, 2023).

De acordo com o relatório, no primeiro semestre de 2023, mais da metade dos painéis exportados da China seguiram para a Europa, ou seja, 52,5% do volume. O continente registrou, ainda, o maior aumento absoluto em comparação com o ano de 2022, com mais de 21 GW. Com isso, atingiu um total de 65 GW enviados nos primeiros seis meses de 2023. Em 2022 foram enviados 44 GW no mesmo período (EMBER, 2023).

De acordo com a Ember (2023), depois de instalada, essa nova capacidade poderá abastecer em torno de 2% da demanda por energia da Europa, anualmente. Isso é semelhante à demanda da Bélgica e sustenta os objetivos daquela região, ou seja, expandir a independência energética.

A África do Sul foi a que registrou a mudança mais significativa, uma vez que importou 3,4 GW de módulos solares chineses, ainda no primeiro semestre de 2023, resultando em um acréscimo de 438%. Trata-se, portanto, de mais 2,7 GW comparados ao mesmo período de 2022. Sendo assim, a África teve um aumento de 187%, ou seja, mais 3,7 GW, e foi, então, a região com maior crescimento (EMBER, 2023).

O Oriente Médio apresentou o aumento relativo mais rápido depois da África, com 64%, ou seja, mais 2,4 GW no primeiro semestre de 2023, comparado ao mesmo período de 2022.

Contudo, a pesquisa apontou que as altas taxas se inserem no contexto de um ponto de partida bastante baixo (EMBER, 2023).

Em relação a 2022, a Arábia Saudita teve um acréscimo nas importações de energia solar da China seis vezes maior. Assim, chegou a 2,8 GW nos primeiros seis meses de 2023. Enquanto isso, os Emirados Árabes Unidos tiveram um acréscimo das importações em 33%, ou seja, 1,4 GW.

Enquanto isso, o Brasil se destaca como o segundo maior importador de painéis solares da China, e a Ásia foi a única região que registrou importações menores da China durante o período porque a Índia passou a se dedicar ao acréscimo da capacidade de fabricar seus próprios equipamentos fotovoltaicos (EMBER, 2023).

Conforme análise feita pelo *think tank*, o fornecimento mundial de painéis fotovoltaicos não constitui um largo passo para o avanço acelerado da energia solar. Há uma expectativa de que dobre, novamente, a capacidade de fabricação mundial até o final de 2024 em comparação ao final de 2022, enquanto outros países também devem incrementar sua fabricação própria.

Entretanto, a brecha existente entre a capacidade fotovoltaica instalada e as exportações de painéis está crescendo. Isso reflete, parcialmente, no acúmulo de estoques de módulos nos armazéns, assim como nos desafios para ampliar a instalação e a integração da rede de produção de energia solar.

A existência de módulos fotovoltaicos é suficiente para suprir a demanda. Contudo, é preciso, apenas, acelerar a sua instalação. Dessa forma, as políticas públicas e privadas precisam recair na garantia de que a integração e a instalação da rede aumentem tão rápido quanto o fornecimento mundial de painéis.

De acordo com o relatório Tendências Globais em Investimento em Energias Renováveis 2019, publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e pela Bloomberg New Finance, o investimento em capacidade de energias renováveis ultrapassou 250 bilhões de dólares por ano entre 2014 e 2018. Considerando a década como um todo, o relatório estima que um total de 2,6 trilhões de dólares foram investidos em todo o mundo. Em 2019, as energias renováveis no total (incluindo as grandes centrais hidrelétricas) representam 26,3% do total da eletricidade produzida em todo o mundo (BNEF, 2023).

Por outro lado, também houve avanços significativos relacionados aos métodos de instalação e desmontagem de instalações solares. Tendo em vista o exemplo da Universidade

Nacional Australiana, cientistas desta universidade têm investigado formas de instalar painéis solares em ambientes off-shore, como pode ser visto na Figura 9, fazendo com que os painéis flutuem em mares equatoriais calmos na costa da Nigéria, da Indonésia e Cingapura. Graças aos fatores ambientais de ventos suaves, ondas suaves e forte luz solar, um conjunto de painéis solares instalados nesses mares poderia gerar energia quase ilimitada para populações locais (BNEF, 2023).



Figura 9: Painel solar off-shore na Cingapura. Fonte: AVALANCHE, 2021.

Como outro exemplo de avanços significativos relacionados aos métodos de instalação e desmontagem de instalações solares, a rápida evolução da tecnologia solar criou uma quantidade significativa de painéis desgastados, danificados e obsoletos – todos os quais são atualmente eliminados em aterros. Para reduzir esse desperdício, algumas empresas começaram a abrir fábricas de desmontagem e reciclagem de painéis solares, entre elas a empresa We Recycle Solar abriu a primeira fábrica de reciclagem de painéis solares em grande escala nos Estados Unidos e desenvolveu vários processos para reformar ou reaproveitar painéis solares antigos.

3.1 PROJEÇÃO PARA O FUTURO

Utilizando uma metodologia criada pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), esse tópico apresenta uma projeção do crescimento do uso de painéis fotovoltaicos e dos resíduos produzidos durante todo o ciclo de vida dos painéis, e ainda alerta para os impactos socioambientais causados por esse crescimento.

Com base nas previsões da "curva de aprendizado", que pode ser observada na Figura 10, ainda reforçados pela primeira Crise do Petróleo em 1973, quando os países produtores de petróleo decidiram aumentar o preço do petróleo bruto e exercer mais controle sobre o seu suprimento, os primeiros sinais de expansão da comunidade fotovoltaica teve início

principalmente com as tecnologias de silício policristalino e filme fino de Telureto de Cádmio (CdTe).

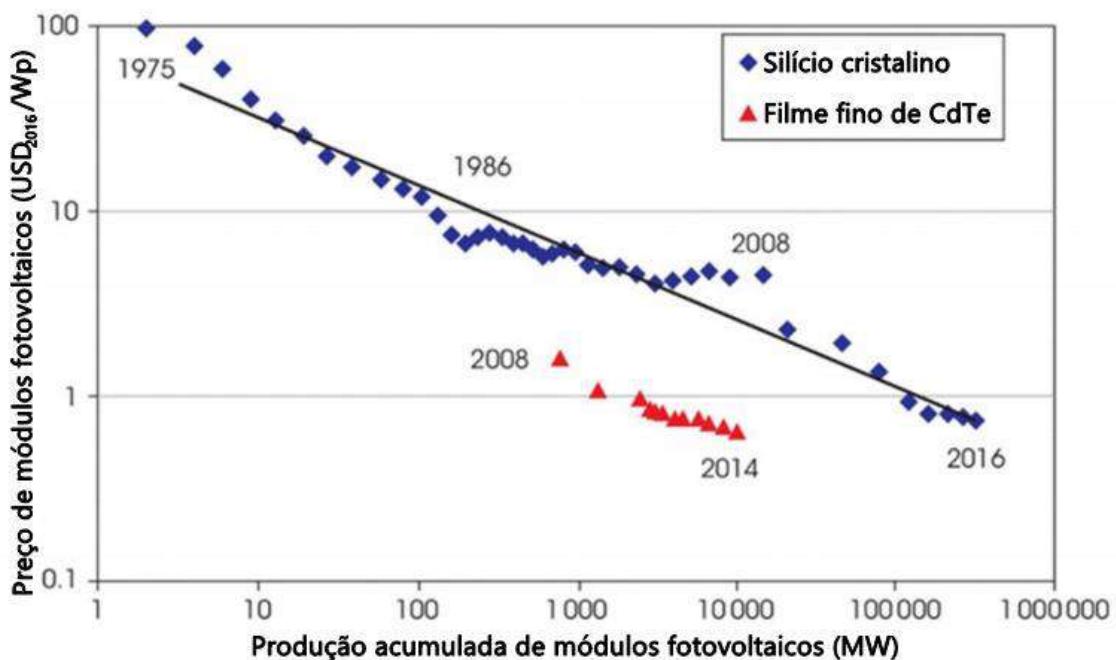


Figura 10: A "curva de aprendizado" (curva de experiência de preço) para módulos fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de IRENA, 2016.

A primeira etapa analisa as tendências e as futuras taxas globais de crescimento de energia solar fotovoltaica de 2010 a 2050. A segunda etapa tem como objetivo a quantificação dos volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos gerados durante as fases do ciclo de vida. A terceira etapa é a projeção da quantidade de resíduos gerados, que pode ser avaliado globalmente ou por países (IRENA, 2016).

Para contabilizar os fluxos de resíduos atuais e futuros dos painéis fotovoltaicos, as taxas globais de crescimento de energia fotovoltaica foram projetadas até 2050. As projeções se baseiam nos resultados obtidos em trabalhos anteriores sobre previsões de energia fotovoltaica da IRENA e da Agência Internacional de Energia (IEA). Para as projeções para 2030, foram utilizadas as previsões da IRENA, que dobram a participação global de energias renováveis (IRENA, 2016). Para o período de 2030 até 2050, as projeções são baseadas no Roteiro de Tecnologia da IEA sobre Energia Solar Fotovoltaica (IEA, 2014).

A implantação global acumulada de painéis fotovoltaicos acelerou após 2010 e espera-se um crescimento exponencial, atingindo 1.632 GW em 2030 e cerca de 4.512 GW em 2050, conforme mostra a Figura 11.

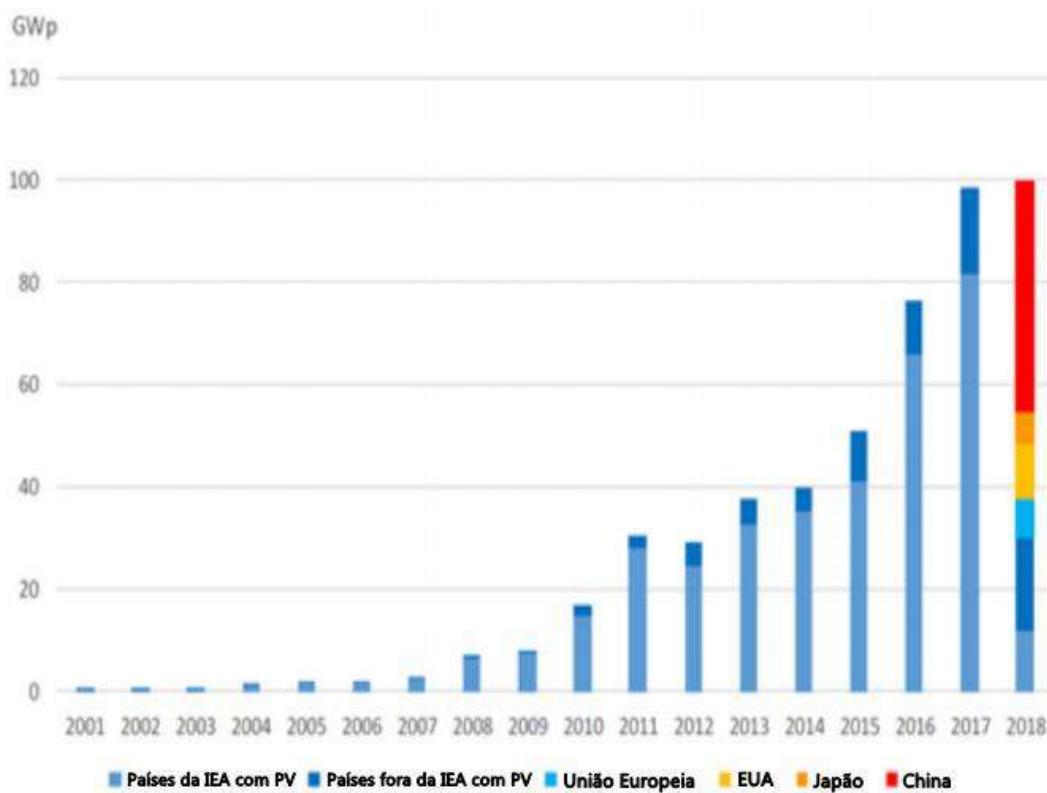


Figura 11: Crescimento global acumulado de painéis fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de IEA, 2014.

Para desenvolver estimativas anuais da capacidade fotovoltaica entre 2016 e 2030, foi feita uma interpolação entre as estimativas REmap da IRENA para 2015, 2020 e 2030. Para isso, foi calculada uma taxa média de crescimento anual entre cada período de cinco anos, totalizando 8,92%. Em alguns países selecionados, as taxas de crescimento individual podem ser ajustadas mais altas ou mais baixas devido às incertezas políticas e econômicas previstas. Para estender a projeção do modelo para 2050, foram assumidas projeções de crescimento mais conservadoras para o período de 2030 até 2050, com taxa de crescimento anual de cerca de 2,5%. Essa extração foi combinada com a previsão do roteiro de tecnologia fotovoltaica da IEA.

As projeções finais do crescimento global de PV para 2050 são mostradas na Tabela 7 e foram usadas para modelar fluxos de resíduos globais na segunda etapa, apresentada neste trabalho em tópicos posteriores.

Tabela 7: Capacidade acumulada projetada de painéis fotovoltaicos no mundo.

Ano	Capacidade acumulada
2015	222
2020	511
2025	954
2030	1.632
2035	2.225
2040	2.895
2045	3.654
2050	4.512

Fonte: IRENA (2016) e IEA (2014).

3.2 CENÁRIO NACIONAL

O Brasil possui um grande nível de insolação e reservas de quartzo com qualidade para a distribuição de energia solar. Especialmente no Nordeste, com destaque para o Vale do São Francisco, há altos índices de irradiação solar global, sobressaindo-se entre todas as regiões geográficas com a maior média anual (PORTALSOLAR, 2023).

No país, os valores máximos de irradiação solar podem ser observados na região central da Bahia ($6,5 \text{ kWh/m}^2$ ao dia), envolvendo também o noroeste de Minas Gerais. Sendo assim, suas temperaturas correspondem a um regime de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação em regiões semiáridas durante todo o ano. Ainda assim, é válido destacar que também é possível observar grande potencial de aproveitamento energético, mesmo havendo regiões com menores índices de insolação. Logo, existem diversas maneiras para aproveitar a energia solar no Brasil (PORTALSOLAR, 2023).

O Brasil é o mercado que mais investiu em transição energética no mundo, ficando atrás apenas da China. O Brasil se destaca no cenário de energia fotovoltaica e atraiu um total de US\$ 86 bilhões em investimentos em energia renovável entre 2013 e 2022. A perspectiva é que a energia solar se torne a maior fonte de geração elétrica do país em 2050 em número de investimentos realizados, de acordo com o levantamento feito pela BloombergNEF em 2023.

O mercado brasileiro de geração distribuída de energia solar representou US\$ 13,4 bilhões em investimentos somente em 2022. Esse segmento se refere a sistemas de energia solar de pequeno porte voltados para consumo residencial, comercial e rural. Além disso, levando

em conta a geração centralizada, que corresponde às grandes usinas fotovoltaicas conectadas ao sistema elétrico brasileiro, o montante investido na energia solar em 2022 chega a US\$ 17,4 bilhões (BNEF, 2023).

No ano de 2021, o Brasil já figurava entre os dez maiores países do mundo em capacidade instalada de energia solar. Apesar desse crescimento expressivo, o Brasil ainda está atrás de vários países, e o potencial de expansão é enorme. Embora o país conte com 89,9 milhões de unidades consumidoras de energia elétrica na geração distribuída, apenas 3,2 milhões delas são beneficiadas pela geração solar distribuída. Esses dados mostram que há um vasto mercado a ser explorado e um grande espaço para o desenvolvimento da energia solar no Brasil, estando muito longe de se tornar um mercado saturado (BNEF, 2023).

A adoção crescente da energia solar na matriz energética brasileira traz uma série de benefícios. Primeiramente, a energia solar contribui para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes de energia fóssil e aumentando a segurança energética do país. Esse ponto é especialmente relevante considerando a volatilidade dos preços do petróleo e a instabilidade geopolítica em torno dos combustíveis fósseis (BNEF, 2023).

Além disso, a energia solar apresenta um custo cada vez mais competitivo em relação às fontes tradicionais de energia. Os avanços tecnológicos e a escala de produção têm reduzido os custos dos painéis solares, tornando a energia solar uma opção mais acessível para consumidores e empresas. Outro benefício importante é a geração de empregos e o estímulo à economia. A expansão da energia solar no Brasil cria oportunidades de trabalho em toda a cadeia produtiva, desde a fabricação dos painéis solares até a instalação e manutenção dos sistemas. Por outro lado, a produção de energia solar contribui para o desenvolvimento de indústrias locais e o fortalecimento da economia nacional (BNEF, 2023).

Em paralelo com a expansão da matriz elétrica brasileira centralizada, o Brasil conta com outro crescimento na oferta: o da Microgeração e o da Minigeração Distribuída (MMGD). Esse tipo de geração de energia ocorre quando o consumidor brasileiro gera sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. De acordo com os dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2024, o Brasil conta com mais de 2,4 milhões de sistemas conectados à rede de distribuição de energia elétrica, com potência instalada superior a 27,7 GW. Mais de 3,5 milhões de unidades consumidoras utilizam os excedentes e os créditos da energia gerada nos sistemas instalados (ANEEL, 2024).

Conforme noticiado pela ANEEL em 2023, foram instalados mais de 625 mil sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil, com o acréscimo de 837 mil unidades consumidoras que passaram a utilizar os excedentes e os créditos da energia gerada nos sistemas instalados (ANEEL, 2024).

A MMGD pode ser proveniente da microgeração, quando a energia produzida por um central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW), ou da minigeração distribuída, com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 3 MW, podendo chegar a 5 MW em situações específicas, nos termos dos incisos IX e XIII e do Parágrafo Único do art. 1º da Lei nº 14.300/2022, que diz que não se classifica como microgeração distribuída a central geradora que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW, menor ou igual a 5 MW para as fontes despacháveis menor ou igual a 5 MW para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW para as fontes não despacháveis, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2024).

As potências de geração centralizada e de MMGD apresentam gerações de energia elétrica que são utilizadas de modo diferente. Por esse motivo, a ANEEL não soma as potências de geração centralizada e de MMGD. No caso da geração centralizada (200 GW de capacidade), a energia elétrica gerada é comercializada no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), tanto no Ambiente de Comercialização Regulada (ACR), com preços regulados, como no Ambiente de Comercialização Livre (ACL), considerando inclusive grandes Autoprodutores de Energia Elétrica (APE). A geração centralizada é, assim, entregue a todas as distribuidoras de energia elétrica para que elas possam cumprir o compromisso de fornecer energia de qualidade para todos os consumidores conectados à rede (ANEEL, 2024).

A energia elétrica produzida pelos sistemas de micro e minigeração distribuída é utilizada prioritariamente pelos consumidores proprietários desses sistemas e por outras unidades consumidoras relacionadas a eles. Apenas a energia elétrica produzida pelos sistemas e não aproveitada por essas unidades, chamada energia excedente, é lançada na rede da distribuidora, ao preço da tarifa, por meio da compensação na conta de luz, para utilização dos demais consumidores, juntamente com a energia entregue pelas usinas centralizadas (ANEEL, 2024).

Em janeiro de 2024, a energia solar bateu o recorde de geração instantânea, segundo informação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). No dia 30 de janeiro de 2024, às 11h40, a produção elétrica solar alcançou a marca de 27.909 MW, incluindo Micro e

Minigeração Distribuída (MMGD). O montante foi suficiente para atender a 30,4% da demanda naquele minuto de todo o Brasil. O recorde anterior tinha ocorrido em 11 de novembro de 2023, com 27.435 MW, também considerando MMGD (ANEEL, 2024).

Ainda em janeiro de 2024, ainda de acordo com o ONS, o subsistema Nordeste também registrou índices inéditos de geração solar instantânea: 9.231 MW, aferidos às 11h18 de 31 de janeiro. O volume correspondeu a 66,8% da demanda da região. A marca mais elevada até então era de 9.035 MW, registrada em 18 de janeiro de 2024.

Por outro lado, a energia das usinas solares e eólicas brasileiras está ajudando o país a faturar alto com a exportação de energia excedente para nações vizinhas. Em 2023, cerca de 844 MW médios de energia elétrica foram comercializados para a Argentina e o Uruguai, sendo o maior volume já contabilizado em toda a história, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). De acordo com a entidade, a produção elétrica por sistemas fotovoltaicos e eólicos foi fundamental para a formação de um cenário energético mais favorável para a exportação do excedente de energia no ano passado, e pelos cálculos da instituição, o benefício para o Brasil chegou a R\$ 888 milhões (CANALSOLAR, 2024).

Levando em conta também o segmento de geração centralizada, que corresponde a grandes usinas fotovoltaicas conectadas ao sistema elétrico brasileiro, o montante investido na fonte solar em 2022 chegou a US\$ 17,4 bilhões. Em 2023, o setor de renovável como um todo somou US\$ 24,9 bilhões no país (PORTALSOLAR, 2023).

Ainda nesse tópico, o Brasil atraiu US\$ 86 bilhões em investimentos em energia renovável entre 2013 e 2022. Segundo o relatório da BloombergNEF (2023), excluindo a China, o Brasil é o mercado emergente que mais investiu em transição energética no mundo, muito por causa da energia solar, que será a maior fonte de geração elétrica em investimentos do país em 2050, com 30% de participação na matriz.

A relação entre o custo de investimento na tecnologia fotovoltaica e os preços de energia elétrica no Brasil é um dos principais fatores para a perspectiva de crescimento do mercado solar no país. Há uma tendência natural em todas as tecnologias de queda de preço ao longo do tempo, e esse padrão não é diferente para a energia solar. Tendo em vista que, em 2023, o preço dos módulos caiu mais do que o esperado, o cenário para a fabricação de módulos fotovoltaicos se desenha de forma que os fabricantes estão ficando com margens cada vez menores, levando

a uma possível consolidação de mercado. Embora essa redução de preços não seja infinita, há uma tendência para que os preços continuem caindo (BNEF, 2023).

Além de mais baratos, os painéis solares estão se tornando mais eficientes. As tecnologias mais recentes permitem que os módulos apresentem uma eficiência em torno de 21%. De acordo as projeções, percebe-se que esse número chegará a 34% em 2050. Dessa forma, com a mesma quantidade de dinheiro, será possível “gerar” mais energia. Ao levar em consideração ainda as volatilidades relacionadas aos preços e subsídios no setor elétrico brasileiro, que, historicamente, tendem a levar a um aumento dos custos, há um sentimento otimista em relação à continuidade da expansão da capacidade instalada de energia solar (BNEF, 2023).

O compromisso de triplicar o uso de energias renováveis no mundo e de duplicar a eficiência energética até 2030, assumido por mais de 110 países na 28^a Conferência das Partes sobre Mudança do Clima das Nações Unidas (COP28), realizada em dezembro de 2023, em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, traz uma grande oportunidade para o Brasil se posicionar como liderança e protagonista nesse processo, graças a seus vastos recursos naturais renováveis (ABSOLAR, 2023).

Na avaliação da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), que participou de diversos eventos, encontros, reuniões e debates ao longo da COP28, o acordo reconheceu, de forma inquestionável, o papel estratégico das energias renováveis na redução de emissões de gases de efeito estufa e no combate às mudanças climáticas que ameaçam a humanidade (ABSOLAR, 2023).

Entretanto, um dos pontos de atenção do texto final assinado pelos países participantes da Conferência foi a ausência de um compromisso explícito para a eliminação gradual dos combustíveis fósseis das matrizes energéticas. O acordo, apesar de importante, não é suficiente para limitar o aumento da temperatura global aos níveis recomendados pelos cientistas, já que o uso de combustíveis fósseis ameaça intensificar ainda mais os eventos climáticos extremos e ampliar os danos decorrentes do aquecimento global (ABSOLAR, 2023).

Na COP28, ficou evidente que muitos países planejam estar, em décadas, num patamar de desenvolvimento de fontes renováveis que o Brasil já possuía em 2023. Além disso, a Amazônia é um dos maiores ativos ambientais do Brasil e que é preciso transformar este potencial em desenvolvimento socioeconômico para a região e suas populações. A partir disso,

o potencial brasileiro é imenso, já que o país alcançou recentemente a marca de 38 GW de potência instalada da fonte solar fotovoltaica, somando as usinas de grande porte e os sistemas de geração própria de energia em telhados, fachadas e pequenos terrenos, o equivalente a 16,8 % da matriz elétrica do país (ABSOLAR, 2023).

Desde 2012, a fonte solar entregou ao Brasil mais de R\$ 150,7 bilhões em novos investimentos, mais de R\$ 45,8 bilhões em arrecadação aos cofres públicos e gerou cerca de 1 milhão de empregos acumulados. Com isso, contribuiu para a evolução da redução de emissões ao longo do tempo, sendo evitadas 38,5 milhões de toneladas de CO₂ na geração de eletricidade (ABSOLAR, 2023).

Contudo, a produção de energia fotovoltaica é uma potência brasileira que ainda está muito abaixo de sua capacidade de geração energética. Apesar da localização privilegiada do país para captação e produção, a energia solar representa apenas 2,6% da matriz energética nacional. Ainda assim, o número de lares e empresas alimentadas via painéis solares está em constante crescimento. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em 2023 o Brasil alcançou a marca de 1,6 milhão de sistemas instalados em todo o país. A maior parte das buscas é por parte de famílias que querem reduzir as contas de energia elétrica, além de utilizar fontes de energia que não poluem o meio ambiente. A saber, o uso doméstico pode ser feito de duas formas: a partir do aquecimento da água via energia térmica ou a partir da geração de energia elétrica convencional (ABSOLAR, 2023).

Conforme dados da ABSOLAR, 75,2 milhões de residências brasileiras estão aptas a adotarem energia solar no Brasil. Contudo, apenas 2,2% delas se beneficiam do sistema, sendo que uma das principais objeções dos brasileiros para a instalação da tecnologia fotovoltaica é, sobretudo, o alto custo inicial para sua aquisição. No entanto, o produto está em fase de popularização, com a redução do seu valor graças aos incentivos da iniciativa pública e privada (ABSOLAR, 2023).

O crescimento do setor de energia solar está sendo explorado ao longo dos anos. Apenas em 2018 foram investidos mais de 3 bilhões em linhas de financiamento e crédito para produtos. Tendo em vista que até 2026 está em vigência o imposto zero sobre painéis fotovoltaicos, a tendência é que a expansão seja ainda mais rápida até essa data (ABSOLAR, 2023).

De acordo com o boletim divulgado pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), o Brasil apresentou uma estabilidade em relação ao consumo de energia elétrica em

abril de 2023. Assim, foram 65.265 MW médios, o que significa um volume similar ao registrado em 2022, no mesmo período. Mas, a energia solar registrou aumento de 60%, por meio das fazendas solares, que produziram mais de 2.001 MW médios em abril de 2023, considerando o mesmo período do ano anterior (CCEE, 2023).

Embora tenham sido 65.265 MW médios de consumo de eletricidade, apenas 24.214 MW médios foram disponibilizados pelo Mercado Livre, segundo a CCEE. O Mercado Livre é um mercado que fornece energia para grandes empresas, como redes de varejo e shopping centers, além de indústrias. Tal volume equivale a um pequeno aumento, na ordem de 0,4% em comparação ao mesmo período de 2022, e ainda não atinge a maior parte da população do país (CCEE, 2023).

4. DESCARTE E RECICLAGEM DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (2016), o uso dos painéis está cada vez mais popular em todo o mundo. Porém, embora seja uma alternativa sustentável para geração de energia, a reciclagem desse material é complexa de se fazer. Em sua composição, além de vidro, alumínio e plástico, que são recicláveis, as placas fotovoltaicas também contém células solares com metais pesados como o chumbo e cádmio (IEA, 2019). Por isso, é fundamental ter de redobrar a atenção no descarte de painéis solares.

Sendo assim, devido a sua alta complexidade, quando feito de maneira errada, o descarte de painéis solares pode se tornar algo perigoso. Ainda que em sua composição tenha diversos itens recicláveis, a separação dos que estão misturados pode dificultar o processo, podendo inviabilizá-lo.

Uma vez que pertencem à categoria de lixos eletrônicos, as substâncias tóxicas contidas nos painéis solares impactam todo o ecossistema quando os painéis são descartados no solo. É válido destacar, ainda, que as atuais opções disponíveis no mercado de painéis solares perdem sua eficiência de 6% a 10% após 10 anos de uso. Portanto, o descarte do painel não é a preocupação principal do comprador ao adquirir o produto (IEA, 2019).

Depois de 25 anos, contudo, o produto sofre uma queda de 20%. Em contrapartida, produtos de alta qualidade podem apresentar uma boa performance durante 30 a 40 anos, funcionando após esse período com uma qualidade comprometida (IEA, 2019).

Por outro lado, uma das principais razões para que seja realizada a reciclagem de painéis solares é que, com a reciclagem, pode-se diminuir a presença de alumínio, vidro e outros materiais considerados valiosos em aterros sanitários. Outro fator importante refere-se ao aproveitamento das matérias-primas, possibilitando que sejam produzidos novos painéis solares com o uso desses materiais reaproveitados.

A Tabela 8 apresenta os principais constituintes dos painéis solares. É importante ressaltar que a lista abaixo dos materiais constituintes considera apenas painéis solares utilizando silício policristalino e monocristalino, esses que representam 93% da participação no mercado (OLIVEIRA et al., 2017).

Tabela 8: Principais constituintes dos painéis solares de silício policristalino e monocristalino.

Materiais	Silício Monocristalino ou Policristalino
Vidro	74,16%
Polímero	11,31%
Alumínio	10,30%
Silício	3,35%
Cobre	0,57%
Prata	0,01%
Estanho	0,12%
Zinco	0,12%
Chumbo	0,06%
Telúrio	-
Cádmio	-

Fonte: CRUZ, 2012.

O vidro, apesar de ter um processo de decomposição longo, é facilmente reaproveitado na reciclagem, caso seja descartado corretamente. Entretanto, ao observar a Tabela 8, nota-se a presença de chumbo, elemento prejudicial ao meio ambiente e aos seres humanos. Estima-se que um total de 84 toneladas de chumbo sejam descartadas até 2050. A contaminação por metais cumulativos, como chumbo e alumínio, resulta numa maior preocupação em relação à poluição e seus efeitos sobre os humanos, como câncer, efeitos neurológicos, toxicidade renal, entre outros (CRUZ, 2012).

Sendo assim, o descarte de módulos solares é complexo e exige questões legais, tecnológicas e políticas. Ao contrário de outros países, no Brasil ainda não existe uma legislação específica para a reciclagem de painéis solares, por isso é importante que se baseie em modelos de legislações já existentes em outros países para elaborar o seu próprio.

4.1 CENTROS DE RECICLAGEM

A razão pela qual existem tão poucas instalações para a reciclagem de painéis solares é que, até recentemente, não havia resíduos a serem processados ou reutilizados em larga escala. A primeira geração de painéis solares domésticos está chegando ao fim de sua vida útil, que

dura em média 30 a 40 anos, apresentando uma boa performance. Portanto, há necessidade de uma ação urgente para lidar com o problema uma vez que o tempo médio de descarte finalmente foi alcançado.

Uma empresa que se destaca na área de reciclagem de painéis solares é a startup francesa ROSI que desenvolveu o projeto de Ramp-PV para reciclagem de matérias-primas de painéis solares no final de sua vida útil, recebendo até o primeiro "Prêmio Indústria do Futuro" da União Europeia para pesquisas tecnológicas. Depois de garantir, 700.000 euros da Horizon, programa de financiamento de pesquisa e inovação da União Europeia, o projeto de dois anos reforçou o objetivo da ROSI de se tornar líder mundial na reutilização de silício e prata de painéis fotovoltaicos. A empresa espera poder extrair e reutilizar 99% dos componentes de uma unidade. Por esse motivo, a França já é líder entre as nações europeias quando se trata de processamento de resíduos fotovoltaicos (ROSISOLAR, 2024).

A ROSI vem desenvolvendo os processos e tecnologias para extrair materiais de alta pureza de resíduos fotovoltaicos, reintegrando-os em processos importantes, inclusive reutilizando-os para gerar energia solar. A ROSI inaugurou a primeira usina de reciclagem desse tipo em Grenoble, França, em 2024, e pretende expandir para a Alemanha, Itália e Espanha nos próximos anos. A organização Soren faz parceria com a ROSI e outras empresas, coordenando o descomissionamento de painéis solares em toda a França (ROSISOLAR, 2024).

Além de reciclar as frentes de vidro e molduras de alumínio, a nova fábrica pode recuperar quase todos os materiais preciosos contidos nos painéis solares, como prata e cobre, que normalmente são alguns dos materiais mais difíceis de extrair dos painéis uma vez que cada painel solar contém apenas pequenos fragmentos desses materiais preciosos e esses fragmentos estão tão entrelaçados com outros componentes os quais, por muito tempo, não se demonstravam economicamente viável para separação (ROSISOLAR, 2024).

Após a separação, esses materiais mais escassos podem ser posteriormente reciclados e reutilizados para fazer novas unidades solares mais potentes. O vidro recuperado por esses métodos pode ser utilizado na confecção de ladrilhos, ou no jateamento de areia, também pode ser misturado a outros materiais para fazer asfalto, mas não deve ser utilizado em aplicações que requeiram vidro de alta qualidade, como a produção de novos painéis solares (ROSISOLAR, 2024).

Em 2024, a fábrica francesa estima reciclar cerca de 3.000 toneladas de painéis solares, extraindo 90 toneladas de silício, 30 toneladas de cobre e 2,5 toneladas de prata. Até 2025, a capacidade de reciclagem da planta deve aumentar para 10.000 toneladas. A massa de silício recuperada será revertida para outros usos, como semicondutores e baterias. O cobre e a prata recuperados devem ser reciclados e utilizados em uma variedade de outras indústrias, gerando receitas importantes para a União Europeia (ROSISOLAR, 2024).

Esse projeto de benefício mútuo é um ótimo exemplo de quanto boa pode ser uma ação governamental em sustentabilidade. O apoio da União Europeia, por sua vez, proporciona vários benefícios econômicos e políticos tangíveis à empresa ROSI. Além da amenização de impactos ambientais e da redução de resíduos industriais, o projeto, lançado em novembro de 2020, ajuda a economia europeia a se tornar mais circular por meio da reutilização de materiais caros e escassos (ROSISOLAR, 2024).

Por outro lado, a reciclagem promovida pela ROSI pode amenizar as tensões políticas vividas no continente europeu. A Ramp-PV tem o potencial de aumentar a autonomia estratégica da Europa, ampliando a disponibilidade doméstica de matérias-primas valiosas para a indústria solar, bem como para eletrônicos e baterias, o que pode reduzir no futuro a dependência do continente à energia estrangeira (ROSISOLAR, 2024).

Os governos desempenham um papel essencial na realização dos objetivos de desenvolvimento global em todo o mundo. Sem a presença da ajuda governamental, startups inovadoras como a ROSI simplesmente nunca seriam capazes de colocar suas ideias em prática, nem teriam o ímpeto de buscar e desenvolver soluções para a questão do descarte dos painéis solares. O compromisso, a experiência e o apoio da ROSI pelo Conselho Europeu de Inovação resultaram em uma redução potencial de CO₂ de 400.000 toneladas por ano (ROSISOLAR, 2024).

Enquanto isso, cientistas britânicos vêm tentando desenvolver tecnologia semelhante à da ROSI. Em 2022, pesquisadores da Universidade de Leicester descobriram como extrair prata de unidades fotovoltaicas usando uma solução salina. Contudo, os testes ainda estão ocorrendo em escala piloto, o que comprova que a ROSI é a única empresa em seu segmento a escalar sua operação para níveis industriais a promover a reciclagem de painéis solares de maneira eficiente na Europa.

Como a tecnologia para reciclar painéis solares é prematura, ainda existem muitas barreiras a serem superadas. Na Europa, os importadores ou produtores de painéis solares são responsáveis por processá-los, ou reciclá-los, quando se tornam descartáveis. Por isso, muitas empresas preferem triturar os resíduos dos painéis ao invés de investir em tecnologias para reciclagem, como a ROSI, por ser mais barato.

No continente americano, a primeira fábrica de reciclagem de painéis solares em grande escala da América do Norte foi inaugurada em 2023 para resolver a questão de resíduos solares na cidade desértica de Phoenix, onde Arizona, Califórnia, Sonora e Baja Califórnia se encontram. A We Recycle Solar recicla painéis empilhados e amarrados que chegam do principal armazém de coleta da empresa em Hackettstown, Nova Jérsei, além de seis outros locais em todo o país.

O funcionamento da fábrica começa por trabalhadores que manobram as pilhas até a ampla instalação de 7.000 m² em empilhadeiras e, em seguida, levantam cuidadosamente cada uma delas com a mão para começar a separar por marca e modelo. Alguns apresentam apenas algumas rachaduras no vidro, às vezes devido a danos causados por tempestades (WERECYCLESOLAR, 2023).

Até 2050, os resíduos solares totalizarão cerca de 78 milhões de toneladas em todo o mundo. A grande razão pela qual a reciclagem e a recuperação ainda não estão em um estágio mais avançado é o custo de 30 dólares para desmontagem por unidade de painel solar quando custa apenas 1 dólar para enviá-lo para um aterro sanitário (IEA, 2014).

A We Recycle Solar pode processar 7.500 painéis em um único dia, ou equivalente a cerca de 30 milhões de quilogramas por ano. Em junho de 2023, estima-se que a emissão de mais de 650 mil toneladas de dióxido de carbono tenha sido evitada. A empresa consegue reaproveitar cerca de 60% dos painéis que chegam no seu terreno (WERECYCLESOLAR, 2023).

Além disso, a empresa planeja abrir outra instalação de reciclagem ao lado de um grande fabricante de energia solar no Sul dos Estados Unidos. Por enquanto, as empresas de reciclagem solar ainda estão descobrindo como lucrar e reciclar ao mesmo tempo. A We Recycle Solar envia funcionários para desmontar grandes painéis solares, e essa é atualmente sua maior fonte de receita. A revenda de painéis solares recondicionados é a segunda colocada, e a reciclagem é a última fonte de receita. O descomissionamento e a revenda estão, muitas vezes, subsidiando

alguns dos custos de reciclagem, o que sugere que as técnicas de reciclagem ainda precisam avançar (WERECYCLESOLAR, 2023).

4.1.1 Aproveitamento dos Painéis Solares

Questões ambientais importantes surgem durante a vida útil de um sistema fotovoltaico, que começa com a extração e purificação de matérias-primas, prossegue com a fabricação, instalação e muitos anos de operação, e termina com a reciclagem ou descarte de resíduos. Assim, é importante avaliar todo o ciclo de vida dos painéis para conhecer os impactos socioambientais causados pelo uso intensivo de energia fotovoltaica (FTHENAKIS, 2018).

Para quantificar os impactos ambientais causados pelos fluxos de material e energia em cada um dos estágios do ciclo de vida do painel fotovoltaico, é necessário definir todos os estágios do ciclo, desde a extração da matéria-prima até o final da vida útil. O ciclo normalmente começa na mineração de materiais do solo e continua com o processamento e a purificação dos materiais até a fabricação dos compostos e produtos químicos utilizados no processamento e fabricação, transporte, instalação, uso, manutenção e eventual desativação e descarte e/ou reciclagem. Na medida em que os materiais são reutilizados (ou reciclados) no final de sua primeira vida em novos produtos, a estrutura é estendida passo-a-passo (FTHENAKIS, 2018). Esse ciclo de vida para os painéis fotovoltaicos é mostrado na Figura 12.

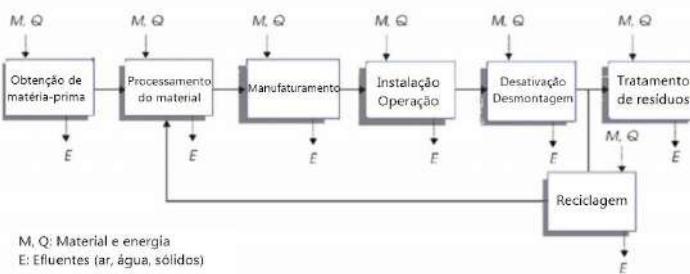


Figura 12: Esquema do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de FTHENAKIS, 2018.

A fabricação de módulos fotovoltaicos requer o uso de muita energia e materiais, como água, metais, plásticos, vidro e outras peças e componentes, que produzem impactos sociais e ambientais. Mesmo que esses impactos ainda sejam menores, a expansão da energia fotovoltaica para os níveis de TW trará impactos significativos nas emissões de gases de efeito estufa e exigirá novas considerações sobre materiais e usos do solo. Quanto mais cedo os impactos puderem ser identificados, avaliados e planejados, maior a probabilidade de se mitigar as consequências (FTHENAKIS, 2018).

Atualmente, existem soluções técnicas bem testadas, processos de separação e recuperação de material, para células fotovoltaicas à base de silício cristalino e células fotovoltaicas de telureto de cádmio, mas não para outras tecnologias. O primeiro passo na reciclagem dos dois tipos de módulos é separar as caixas de junção e, para células tipo c-Si, as estruturas de alumínio. As etapas subsequentes tratam da separação do vidro e do módulo elétrico (FTHENAKIS, 2018).

Entre as formas de reciclagem dos painéis fotovoltaicos de silício estão o tratamento químico e físico. O método químico feito, por exemplo, com solventes traz grande eficiência na reciclagem deste material (COELHO; SERRA, 2018). No processo de reciclagem e separação de material, o processo térmico para os módulos de silícios muitas vezes se torna mais difundido na reciclagem por se tratar de uma opção mais vantajosa no âmbito econômico, rápida e mais simples, associado ao tratamento químico como um segundo passo adicional. Outras técnicas também podem ser realizadas obtendo um percentual satisfatório de silício e outras matérias (DIAS, 2015).

Para os módulos de silício monocristalino c-Si, o tratamento térmico queima os laminados para facilitar os processos de separação, chamados de delaminação do módulo (FTHENAKIS, 2018). A maneira mais comum separar os módulos é por meio de pirólise, aquecendo o módulo a 450-600°C para decompor o encapsulante orgânico. Após a delaminação, os componentes são separados manualmente, o vidro é enviado para uma instalação de reciclagem de vidro e as pastilhas de silício são processadas ainda mais, polindo e reutilizando a pastilha ou reciclando o silício em uma nova pastilha, como pode ser observado na Figura 13.



Figura 13: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Fonte: Adaptado de FTHENAKIS, 2018.

Nas etapas de separação, o fio de cobre, a armação de alumínio, o vidro, o silício e os resíduos são separados e enviados para os recicladores. O plástico é queimado durante o tratamento térmico e os resíduos serão direcionados para um aterro.

Primeiro, os módulos deverão ser transportados para entrar no processo de reciclagem. Em seguida, as caixas de junção são desmontadas manualmente. O tratamento térmico queima os laminados para facilitar os processos de separação. Das etapas de separação, o fio de cobre, a armação de alumínio, o vidro, o silício e os resíduos são separados. Durante o próximo passo, as células solares são tratadas quimicamente. As camadas de superfície e difusão são removidas posteriormente por etapas de limpeza. As células e a quebra do *wafer* são feitas por meio de uma decapagem com ácido. As caixas de junção deverão ser processadas por uma empresa de tratamento de resíduos e/ou sucata eletrônico. O plástico é queimado durante o tratamento térmico. Os resíduos serão direcionados para um aterro sanitário. O alumínio pode ser reutilizado, enquanto vidro, cobre e silício podem ser vendidos para empresas de reciclagem. O processo térmico pode ser aprimorado em relação a sua produtividade, tempo de ciclo e rendimento. O rendimento das células recuperadas depende em grande parte do tipo, design e estado dos módulos a serem processados (FTHENAKIS, 2018).

Fthenakis (2018) considera que a disponibilidade de recursos, a acessibilidade e os menores impactos ambientais possíveis são três pilares principais do crescimento sustentável da energia fotovoltaica para níveis que permitirão a transição da eletricidade atual baseada em combustíveis fósseis para uma renovável (FTHENAKIS, 2018). A reciclagem de módulos fotovoltaicos usados aborda todas essas três dimensões da sustentabilidade. Esses pilares podem ser vistos na Figura 14.



Figura 14: Reciclagem e os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos painéis solares. Fonte: Adaptado de FTHENAKIS, 2018.

Uma das premissas adotadas para a estimativa de reaproveitamento de matérias primas é a de que matérias-primas podem ser tratadas e recicladas a uma taxa de 65% a 70% em massa. Essas taxas de recuperação já são alcançáveis hoje e estão alinhadas aos regulamentos existentes para reciclagem de painéis fotovoltaicos até o momento. Esses números são uma taxa combinada e assumem uma taxa de coleta de 85% do fluxo total de resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil, bem como tecnologias de tratamento e reciclagem de alto valor disponíveis para recuperar a maioria das frações de material. As perdas por processamento mecânico (por exemplo, triturador e pós de moagem) e recuperação térmica de frações de polímeros não recicláveis (por exemplo, plástico duro) são excluídas das taxas (IRENA, 2016).

Além disso, as estimativas são baseadas nas taxas esperadas de tecnologia de células fotovoltaicas (por exemplo, c-Si, CdTE) e composição de resíduos relacionada multiplicada pelo volume acumulado de 1,7 milhão de toneladas para 2030 no cenário de perda regular (IRENA, 2016).

A reciclagem ajuda a evitar a escassez de materiais necessários para a produção e reduz o custo dos módulos fotovoltaicos. Até o início de 2020, os programas de reciclagem foram estabelecidos para apenas dois tipos de módulos fotovoltaicos: CdTe e c-Si. O primeiro recupera o vidro e os elementos semicondutores para reutilização na síntese do CdTe, enquanto o segundo recupera a estrutura de alumínio e o vidro. A partir disso, a reciclagem fotovoltaica de tecnologias maduras como c-Si e CdTe é baseada em técnica e se mostra economicamente viável. Contabilizando a produção secundária da reciclagem e as melhorias contínuas na eficiência do módulo e na utilização de materiais, vários estudos mostram que a disponibilidade de telúrio nas próximas décadas é suficiente para uma produção cumulativa no nível de TW de potência (FTHENAKIS, 2018).

4.2 PROJETOS NO BRASIL

Como não há uma legislação específica para descarte de painéis solares no Brasil, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), além de incentivar a logística reversa de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE), estabeleceu algumas metas para evitar que a destinação do resíduo de painéis chegue até lugares como lixões. A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 16156 de 2013, nomeada “Resíduos de equipamentos eletrônicos – Requisitos para atividade de manufatura reversa”, impõe condições para que os impactos ao meio ambiente sejam minimizados quando se realiza a manufatura reversa de materiais eletrônicos.

O processo de reciclagem pode variar de acordo com os materiais presentes na composição do painel solar. Na sequência, são apresentados os quatro passos que são feitos no descarte de painel solar com módulos feitos de silício, monocristalino ou policristalino.

Primeiramente, deve ser feita a remoção da moldura de alumínio do painel que é considerada totalmente reutilizável. Em seguida, o vidro é separado e segue em uma correia transportadora. Já reciclado, o painel passa por um processamento térmico que eleva a moldura até 932 graus Fahrenheit (500°C), permitindo a decomposição de pequenos resíduos de plásticos que ficam no painel além de fazer com que as células sejam separadas com mais facilidade. Por último, antes de serem fundidos em placas reutilizáveis, os *wafers* de silício são decapados (OLIVEIRA et al., 2017).

Apesar de ser possível fazer uma repotenciação, ou seja, instalar mais módulos fotovoltaicos ao sistema para recuperar a potência original instalada e restabelecer a energia dos primeiros anos de operação, a reciclagem também é uma opção a ser considerada, já que reaproveita o equipamento, que tem por volta de 70% a 80% de índice de reciclagem.

A Figura 15 mostra os painéis típicos de 1^a geração.

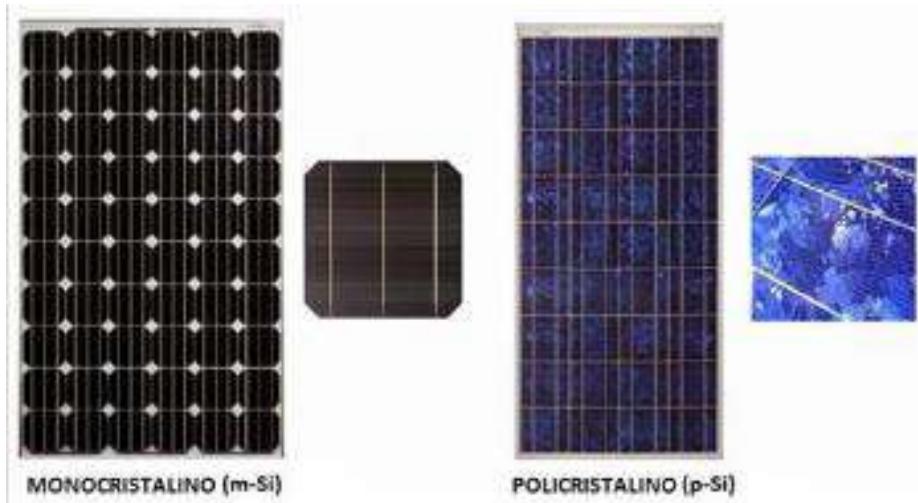


Figura 15: Representação de módulos fotovoltaicos da 1^a geração. Fonte: PORTALSOLAR, 2016.

Por ter um menor custo de fabricação, os painéis de filmes finos ou painéis da chamada 2^a geração foram preferidos, devido a sua espessura e por usar menos materiais semicondutores e flexíveis. Em contrapartida, painéis dessa geração apresentaram uma eficiência inferior aos de 1^a geração, apesar de possuir uma alta capacidade de absorção da irradiação solar. Uma das complicações encontradas nessas células quando foram lançadas foi a rápida degradação, o que

já vem sendo corrigido por alguns fabricantes (OLIVEIRA et al., 2017). A Figura 16 mostra os painéis de 2^a geração.



Figura 16: Representação de módulos fotovoltaicos da 2^a geração. Fonte: PORTALSOLAR, 2016.

As células mais atuais do mercado são as de 3^a geração ou placas orgânicas que ainda possui produção de escala pequena restrita em aplicações acadêmicas e laboratórios de pesquisa e desenvolvimento e ainda são consideradas, no mercado, painéis de baixa eficiência, que fica em torno de 7% quando precisaria chegar a pelo menos 10% (ELY; SWART, 2014). A Figura 17 mostra os painéis de 3^a geração.



Figura 17: Representação de módulos fotovoltaicos da 3^a geração. Fonte: ELY & SWART, 2014.

O avanço notável no campo da energia sustentável, a colaboração entre o Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) conduziu à criação de um processo revolucionário de células solares ultraleves. A Professora Lucimara Stolz Roman, renomada pesquisadora do Departamento de Física da UFPR, conduziu o projeto (SOLFACIL, 2023).

O projeto colaborativo de instituições de ensino superior federais possui alguns pilares, sendo a Eficiência Energética Aprimorada um deles. Essa eficiência corresponde à geração de até três vezes mais energia em comparação com as células solares atuais e é um avanço significativo. Essa característica pode tornar a energia solar ainda mais competitiva em comparação com outras fontes de energia (SOLFACIL, 2023).

Além disso, a Durabilidade Aumentada é crucial para garantir que os sistemas fotovoltaicos sejam economicamente viáveis a longo prazo. Isso também pode resultar em redução de custos de manutenção e substituição. O Processo de Produção Inovador refere-se à capacidade de fabricar essas células solares usando impressoras a rolo, uma abordagem altamente escalável, o que significa que grandes quantidades de células solares podem ser produzidas de maneira eficiente e rápida (SOLFACIL, 2023).

A Versatilidade de Aplicação é a capacidade de aplicar essas células solares em uma variedade de superfícies, desde estruturas arquitetônicas até roupas e acessórios, ampliando o potencial de sua adoção em várias indústrias (SOLFACIL, 2023).

Por último, esse projeto prevê uma Maior Tolerância a Ângulos de Incidência do Sol. A capacidade de gerar energia mesmo quando a luz solar incide em ângulos menos ideais é uma vantagem importante, especialmente em regiões onde a orientação solar é desafiadora (SOLFACIL, 2023).

Os idealizadores dessa tecnologia visionária têm fortes convicções sobre seu potencial transformador. A expectativa é que as células solares orgânicas, fruto desse avanço, se tornem mais econômicas, duráveis, eficientes e recicláveis em um horizonte não tão distante. Isso, por sua vez, pode revolucionar a acessibilidade à energia solar, tornando-a uma realidade mais tangível e benéfica para uma gama mais ampla de pessoas e setores. A obtenção de uma patente para essa tecnologia é um passo importante, pois protege os esforços de pesquisa e inovação, permitindo que as universidades e os pesquisadores continuem desenvolvendo e comercializando essa tecnologia no país e no mundo (SOLFACIL, 2023).

No geral, essa inovação destaca o poder da colaboração entre instituições acadêmicas e a aplicação da pesquisa científica no desenvolvimento de soluções concretas para desafios globais, como a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis no país, enquanto projetos de reciclagem de células fotovoltaicas ainda precisam ser iniciados em larga escala no país.

4.3 PROJEÇÃO DE RESÍDUOS

Grande parte dos resíduos é normalmente gerada durante quatro fases primárias do ciclo de vida de qualquer painel fotovoltaico, sendo estas fases a produção do painel, o transporte do painel, a instalação e uso do painel e descarte no final da vida útil do painel (IRENA, 2016).

Para estimar os volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos, a capacidade fotovoltaica projetada (megawatts ou gigawatts-MW ou GW) foi convertida em massa (toneladas métricas-t). Uma razão média de massa de painéis fotovoltaicos por capacidade unitária (t/MW) foi calculada pela média dos dados disponíveis sobre o peso de painéis e a potência nominal. Assim, foram coletados os dados por alguns dos grandes produtores (Trina, Yingli, Arco Solar, BP Solar, Kyocera, Shell Solar, Sharp, Siemens Solar, Solarex, Solarworld, Solarworld, Aiko) de células fotovoltaicas os quais divulgam características como peso dos painéis publicamente (IRENA, 2016).

Para o estimar os volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos já instalados, foi considerado média da potência e o peso nominais dos tipos de painéis fotovoltaicos padrão mais representativos e de alguns grandes produtores em intervalos de cinco anos, a partir das folhas de dados de painel das empresas produtoras que divulgam características publicamente.

A projeção também precisa incluir um fator de correção para levar em conta que os painéis se tornam mais eficientes e mais leves com o tempo. Essa tendência se deve à otimização do design de células e painéis, bem como à redução de peso para estruturas mais finas, camadas de vidro e *wafer*. O fator de correção é baseado em um ajuste exponencial pelo método dos mínimos quadrados da relação peso/potência para painéis projetados e históricos.

A Figura 18 mostra como a relação peso/potência é continuamente reduzida ao longo do tempo devido a desenvolvimentos adicionais em tecnologias fotovoltaicas, como economia de material e maior eficiência das células solares.

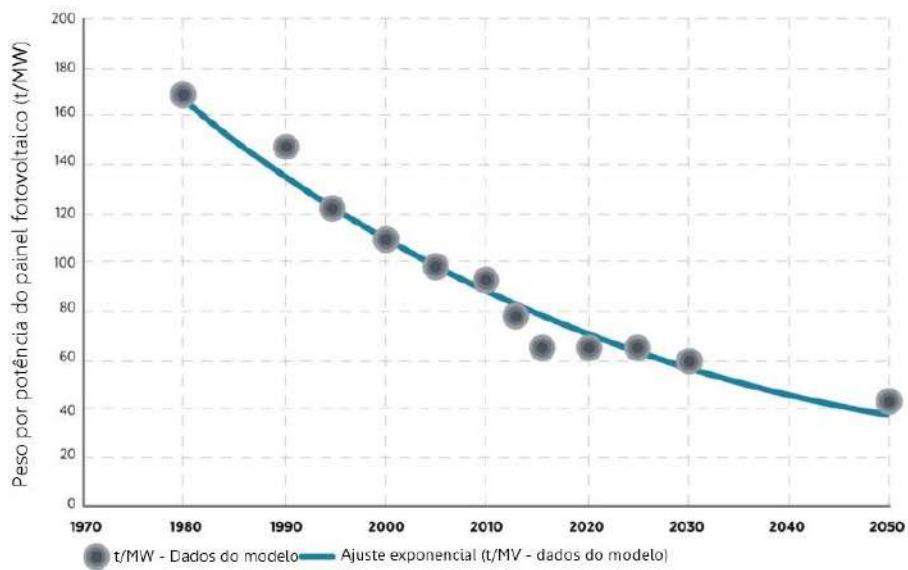


Figura 18: Curva de projeção da relação peso por potência do painel fotovoltaico (t/MW).

Dados: Adaptado de IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016.

As origens de falhas potenciais nos painéis fotovoltaicos instalados, tanto em telhados como no solo, foram analisadas independentemente da tecnologia fotovoltaica e sua aplicação, para estimar a probabilidade dos painéis fotovoltaicos se tornarem resíduos antes de atingir seus objetivos de fim de vida útil estimados (IEA, 2014). Foram identificadas três fases de falha principais dos painéis fotovoltaicos:

1. Falhas precoces: definidas como ocorrendo até quatro anos após a instalação (média de dois anos);
2. Falhas de meia-idade: definidas como ocorrendo cerca de cinco a onze anos após a instalação;
3. Falhas de desgaste: definidas como ocorrendo cerca de 12 anos após a instalação até o final da vida útil (de 30 a 40 anos).

As principais causas de falhas precoces incluem degradação induzida pela luz (observada em 0,5% a 5% dos casos), planejamento inadequado, trabalho de montagem incompetente e construções de suporte inadequadas. Algumas falhas precoces também foram relatadas nos sistemas elétricos, como caixas de junção, caixas de cordas, controladores de carga, cabos e aterramento (IEA, 2014).

As causas de falhas na meia-idade estão relacionadas principalmente à degradação do revestimento antirreflexo do vidro, descoloração do acetato de etileno vinil, delaminação e

isolamento de células rachadas. As causas de falhas foram observadas nos primeiros 12 anos, após a exposição a ciclos de carga mecânica (por exemplo, cargas de vento e neve) e mudanças de temperatura, incluindo degradação potencial induzida, falhas de contato na caixa de junção, quebra de vidro, estruturas soltas, célula falhas de interconexão e defeitos de diodo (IEA, 2014).

O modelo pressupõe que, aos 40 anos, os painéis fotovoltaicos mais recentes sejam desmontados para reforma e modernização. Presume-se, portanto, que a durabilidade dos painéis fotovoltaicos esteja alinhada com as experiências médias de produtos da área da construção civil, como elementos de fachada ou telhas, que tradicionalmente têm uma vida útil de 30 a 40 anos. Os dois cenários, mostrados na Figura 19, assumem uma vida útil média do painel de 30 anos e uma probabilidade de perda de 99,99% após 40 anos. Uma vida útil do painel de 30 anos é uma suposição comum na análise de impacto ambiental da vida útil do painel (IEA, 2014).



Figura 19: Projeção de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050. Dados: Adaptado de IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016.

O lixo anual proveniente de painéis fotovoltaicos até 2050 é mostrado na Figura 19, ilustrando a evolução do fim da vida útil do painel fotovoltaico e das novas instalações de painéis fotovoltaicos proporcionalmente às duas estimativas. Essa relação começa baixa em 5% no final de 2020, ou seja, no cenário de perdas antecipadas, desperdício anual de 220.000 toneladas em comparação com 5 milhões de toneladas em novas instalações. No entanto, aumenta ao longo do tempo entre 4% e 14% em 2030 e entre 80% e 89% em 2050. Nesse ponto, são previstos entre 5,5 e 6 milhões de toneladas de resíduos de painéis fotovoltaicos em comparação com 7 milhões de toneladas em novas instalações de painéis fotovoltaicos (IRENA, 2016).

5. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Muito mais que monitorar competidores ou colaboradores de desenvolvimento de novas tecnologias, as atividades de Prospecção Tecnológica subsidiam as áreas de pesquisa gerando insumos para acelerar o desenvolvimento de novos produtos, de novos mercados e de novos processos.

Nesse âmbito, os depósitos de patentes ganham importância não só por serem um meio de divulgação do conhecimento tecnológico, mas também por medirem o esforço da capacidade de inovação e, consequentemente, os potenciais ganhos oriundos dos investimentos em P&D para novos produtos ou processos que são precedidos pelo licenciamento da tecnologia, parcerias e desenvolvimentos de novos produtos a partir de tecnologias emergentes ou novas tecnologias.

5.1 ROADMAP TECNOLÓGICO

Os Roadmaps Tecnológicos, ou Mapas Tecnológicos, são ferramentas importantes de gerenciamento e planejamento tecnológico, que funcionam no sentido de relacionar as interações entre recursos, objetivos das empresas e mudanças no cenário tecnológico. O mapa é cada vez mais utilizado para estruturar o futuro das tecnologias, uma vez que consegue demonstrar de forma clara e gráfica as principais tendências e expectativas tecnológicas.

Diferentes tipos de mapas foram desenvolvidos, com diferentes objetivos e público-alvo, sempre mantendo a característica de prever o que é provável ou possível de acontecer. Assim, os Roadmaps auxiliam a definir o planejamento estratégico de uma empresa e geram informações relevantes para apoiar as tomadas de decisões.

Sendo assim, com a construção de um Mapa Tecnológico é possível representar graficamente a rota de evolução das tecnologias, produtos e mercados já existentes e a que será construída no futuro, auxiliando os líderes de uma organização no planejamento e alinhamento das ações de desenvolvimento com as metas do negócio.

A elaboração de um Roadmap pode ser desenvolvida de várias formas, sendo a aproximação mais comum à do Roadmap genérico, mostrado na Figura 20. Essa apresentação é baseada no tempo, compreendendo um número de camadas que geralmente incluem perspectivas comerciais e tecnológicas.

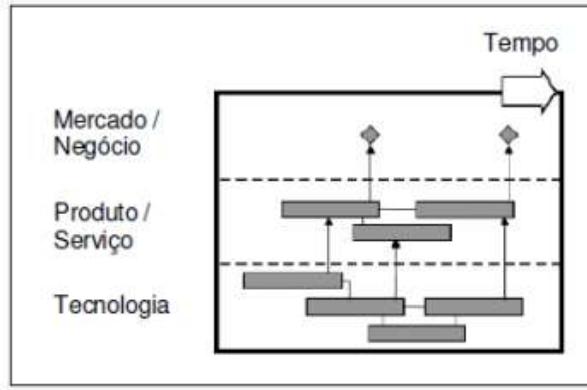


Figura 20: Correlação entre tecnologia, desenvolvimento de produto ou serviço e oportunidades de mercado a partir de um Roadmap genérico. Fonte: PHAAL et al., 2004.

O Roadmap Tecnológico costuma ser dividido em quatro períodos temporais, os quais têm atrelados a si um tipo de documento (BORSCHIVER; LEMOS, 2016). Para a construção desse mapa, foram realizadas quatro buscas para alocar documentos referentes a cada recorte temporal. Estes recortes temporais são:

- Estágio Atual (ano zero): Nesse recorte, encaixam-se as informações obtidas por meio de mídias especializadas e websites de empresas, de organizações governamentais e de organizações não-governamentais. O conteúdo desses documentos é, obrigatoriamente, voltado para ações, tecnologias, parcerias e outros movimentos atuais, no ano de 2023.
- Curto Prazo: Nesse recorte, são analisadas patentes concedidas que, em teoria, demonstram o grau avançado de desenvolvimento tecnológico pelo detentor da patente. Essa conclusão baseia-se no fato de que, se houver proteção de patente, o objeto estará mais próximo de sua fase comercial.
- Médio Prazo: Nesse recorte, são analisadas patentes solicitadas que, apesar de demonstrarem um grau avançado de desenvolvimento da tecnologia pelo detentor da patente, como a proteção ainda está sob análise, possivelmente o objeto estará mais distante de sua fase comercial.
- Longo Prazo: Nesse recorte são analisados artigos científicos que demonstram alto grau inicial de desenvolvimento da tecnologia, uma vez que se encontram em fase de estudo acadêmico.

Na etapa seguinte, denominada Pós-Prospectiva, as informações analisadas foram organizadas em forma de mapa, destacando visualmente os aspectos mais relevantes do estudo, assim como a inter-relação entre as informações. O modelo adotado para este estudo é o

genérico, proposto por Phaal et al. (2004), que consiste em uma representação gráfica baseada no tempo e compreende um número de camadas e subcamadas que tipicamente incluem perspectivas comerciais e tecnológicas (BORSCHIVER; LEMOS, 2016).

Portanto, a definição de Roadmap Tecnológico adotada é um método que auxilia no planejamento estratégico, levando em consideração as camadas mercado, produto e tecnologia de maneira integrada ao longo do tempo.

5.2 METODOLOGIA DA PROSPECÇÃO

O método de prospecção tecnológica empregado no presente trabalho foi pautado, fundamentalmente, em informações oriundas de pesquisas em documentos de artigos científicos, patentes e de mídia especializada.

Os documentos de patentes e artigos científicos são uma potente ferramenta e um instrumento bastante eficaz no apoio à tomada de decisão, tendo em vista o estado da arte disponível no seu conteúdo, que permite identificar tecnologias relevantes, parceiros, concorrentes no mercado, rotas tecnológicas, inovações, investimentos, processos, produtos, PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), fusões e aquisições, dentre outras. Além disso, a utilização de bases de dados padronizadas, com qualidade da informação, permite tratar estatisticamente volumes de dados com baixo risco de erros, que agrupa valor ao conhecimento disponível.

Popper (2008) apresenta a Prospecção como um processo sistemático sendo alimentado por 5 fases distintas e complementares:

1. Pré-prospectiva: definição do objeto;
2. Recrutamento: revisão bibliográfica, lições aprendidas e escolha da base de dados;
3. Geração: busca e tratamento da informação;
4. Ação: análise dos resultados;
5. Renovação: monitoramento e avaliação constante para que o processo ajude a manter os objetivos iniciais, cujo principal desafio é desenvolver indicadores de sucesso;

Primeiramente, a análise de artigos científicos permite a avaliação do que está sendo produzido em escala de laboratório e que pode vir a ser encontrado em escala industrial no

futuro. Essa análise permite, portanto, a realização de uma previsão das tendências do produto escolhido em longo prazo.

Além disso, a análise de patentes permite avaliação das tecnologias que estão mais próximas da aplicação industrial e comercial, sendo as patentes depositadas representantes das tendências em médio prazo e as concedidas, das tendências em curto prazo.

Por último, uma pesquisa a respeito do estado atual permite a avaliação do que está sendo efetivamente produzido pela indústria e a avaliação de tendências mercadológicas.

5.3 RECRUTAMENTO DE INFORMAÇÕES

A metodologia de pesquisa, empregada com o objetivo de mapear artigos científicos dentro do contexto da aplicação de células fotovoltaicas, consistiu em busca por palavras-chave na base de dados Scopus.

Scopus é a base referencial da Editora Elsevier. Ela é a maior fonte referencial de literatura técnica e científica revisada por pares. Dessa forma, a base Scopus permite uma visão ampla do que está sendo publicado cientificamente sobre um tema. Por meio dos mecanismos de busca, as informações publicadas podem ser encontradas por uma determinada instituição, ou um determinado autor, em determinado período de tempo. Ainda, por meio dessas ferramentas é possível obter uma versão visual de seus resultados, para ajudar a compreender e elucidar, por exemplo, em qual país há um maior número de documentos sobre um determinado tema abordado, bem como a área de conhecimento e uma série de outros benefícios.

Nesse contexto, a base de dados Scopus foi selecionada por apresentar grande abrangência, facilidade de download de um elevado volume de documentos, relevância significativa dos artigos científicos e análises Macro facilitadas pela própria estrutura do site.

O levantamento de informações, dentro do escopo do trabalho, oriundas de documentos de patentes consistiu em busca por palavras-chave e/ou classificação internacional de patentes (International Patent Classification - IPC) na Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO). Além da grande abrangência de informações, a página da WIPO oferece acesso a duas bases de dados de patentes, uma de Pedidos de Patente, também chamada de Patentes Depositadas, e outra de Patentes Concedidas. Tal funcionalidade é muito importante para a metodologia de construção do Roadmap Tecnológico.

A base de patentes WIPO disponibiliza as patentes globais concedidas desde 1967. Nessa base, é possível identificar o documento pelo sistema “booleano” ou pelo fornecimento do número do documento. Também, o usuário pode escolher a observação apenas da folha de rosto de tal documento, ou então a visualização completa do documento. Observando os resultados de cada busca, é possível obter informação sobre os inventores e titulares de tais patentes, assim como observar os seus relatórios descritivos, os exemplos, as reivindicações.

Nesse contexto, a base de patentes WIPO foi selecionada pela sua grande abrangência, praticidade no acesso de uma grande quantidade de documentos, alta relevância das patentes e análises facilitadas pela própria estrutura do site.

5.3.1 Artigos Científicos

Inicialmente, buscou-se pelas palavras-chave “photovoltaic cell” (célula fotovoltaica) e “solar cell” (célula solar), nos campos título do artigo, resumo e palavras chave, de forma a obter o maior número possível de documentos entre 2013/8 e 2023/8.

Os critérios de seleção dos documentos foram a sua relevância, atualidade e não repetição. Os resultados obtidos serão apresentados ao longo do trabalho, com indicação dos números de documentos encontrados e documentos selecionados.

Após a análise desses documentos, 30 artigos científicos foram selecionados e considerados relevantes para o estudo prospectivo.

5.3.2 Patentes

Inicialmente, optou-se por utilizar, no site da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), a mesma estratégia de busca por palavras-chave utilizada na busca de artigos científicos, “photovoltaic cell” (célula fotovoltaica) e “solar cell” (célula solar).

Os critérios de seleção dos documentos foram a sua relevância, atualidade e não repetição. Os resultados obtidos serão apresentados ao longo do trabalho, com indicação dos números de documentos encontrados e documentos selecionados.

Após a análise desses documentos, 30 patentes de cada categoria, concedidas e depositadas, foram selecionadas e consideradas relevantes para o estudo prospectivo.

5.3.3 Níveis de Análise

Após a leitura e análise do conteúdo dos documentos selecionados descritos na metodologia de prospecção tecnológica, as informações extraídas foram analisadas em três níveis diferentes, que são Macro, Meso e Micro.

Depois da pesquisa e da coleta dos documentos, foi feita a análise dos resultados obtidos e a esquematização dos dados obtidos para facilitar a futura estruturação do mapa. Essa etapa de prospecção deve ser sistematizada para a extração da informação necessária (BORSCHIVER; LEMOS, 2016).

A segmentação dessa etapa pode ser apresentada em três níveis:

- a) Macro – Nesse nível foram recuperadas as informações imediatas do documento como título, ano, autor, origem do autor.
- b) Meso – Nesse nível foram necessárias a leitura e a análise do resumo do documento de forma a extrair suas informações principais. Em alguns casos, também foi necessária a leitura do conteúdo do artigo e da reivindicação da patente para complementar a informação. Em seguida, foram criadas taxonomias de forma a definir o assunto principal e seu agrupamento antes de passar para o nível seguinte de análise.
- c) Micro – Nesse nível foram extraídas informações ainda mais detalhadas de cada classe Meso para melhor compreensão e caracterização da taxonomia.

No nível Macro, os documentos são analisados de acordo com a distribuição histórica de publicações, a distribuição por países, por universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento da tecnologia, parcerias (internacionais e com empresas).

Em seguida, para o nível Meso, os documentos são categorizados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno das células fotovoltaicas.

A seguir, estas taxonomias identificadas são descritas, após a leitura de cada documento e seleção manual de subcategorias:

- Processo – Refere-se à produção ou à uma etapa produtiva. Um processo é um conjunto de operações ordenadas em que se procede a transformação em produtos finais diferentes.

- Produto – É o que foi obtido e/ou produzido resultante de algum processo e será usado para um determinado fim.
- Matéria-prima – Tipo de material utilizado como fonte de produção das células fotovoltaicas.
- Algoritmo – Quando o tema central se dá em torno de um algoritmo ou simulação matemática envolvendo células fotovoltaicas.
- Equipamento e instrumentação – Foco em um dado equipamento utilizado e/ou tecnologia proporcionada por um equipamento específico.
- Otimização – Refere-se ao processo ou às ferramentas utilizadas para alcançar a melhor condição de produção.
- Propriedade – Refere-se às propriedades inerentes às células fotovoltaicas.
- Aplicação – Determinado fim para que a célula fotovoltaica será utilizada.

No nível Micro, são identificados particularidades e detalhamentos de cada taxonomia da análise Meso. Contudo, cabe ressaltar que o mesmo documento pode estar incluído em mais de uma taxonomia.

5.3.4 Prospecção de Artigos Científicos

No site da base de dados Scopus, escolheu-se fazer a pesquisa avançada, de forma que os campos foram preenchidos de acordo com a Figura 21. Como palavra-chave foi utilizado o termo “photovoltaic cell” (célula fotovoltaica) no primeiro campo, especificando para que aparecesse no título e no segundo campo o mesmo termo, “photovoltaic cell”, especificando para aparecer no resumo, foi utilizado o algarismo booleano AND. Foram escolhidas apenas revistas do tipo *Journals* para a pesquisa e filtrou-se o ano entre 2013 e 2023.

Analyze search results

< Back to results

TITLE (photovoltaic AND cell) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Photovoltaic Cells")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))

1,395 document results

Select year range to analyze: 2013 to 2023 Analyze

Figura 21: Resultados da busca de artigos científicos na plataforma Scopus.

Após utilizar os filtros de pesquisa, a base registrou 1395 artigos, conforme mostrado na Figura 22, dentre os quais foram selecionados os 30 artigos mais recentes.



Figura 22: Refino da busca de artigos científicos na plataforma Scopus.

A análise Macro está relacionada com a série histórica de publicações, os países que apresentaram o maior número de artigos científicos no período estudado e os mais importantes

jornais, universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento de células fotovoltaicas. A primeira análise é a evolução da produção científica em número de artigos científicos por ano, conforme mostrado na Figura 23.

Essa análise temporal mostra um período que coincide com o desenvolvimento de matérias-primas renováveis como soluções alternativas às matérias-primas de origem fóssil.

Quando considerado o tipo de autor (universidade, instituto de pesquisa, empresas), nota-se que a maioria das publicações foi realizada por centros de pesquisas e universidades, conforme apresentado na Figura 27.

A Figura 23 apresenta dados sobre a quantidade de documentos publicados por ano, se limitando apenas a artigos publicados entre os anos de 2013 a 2023, a fim de conseguir uma amostragem maior.

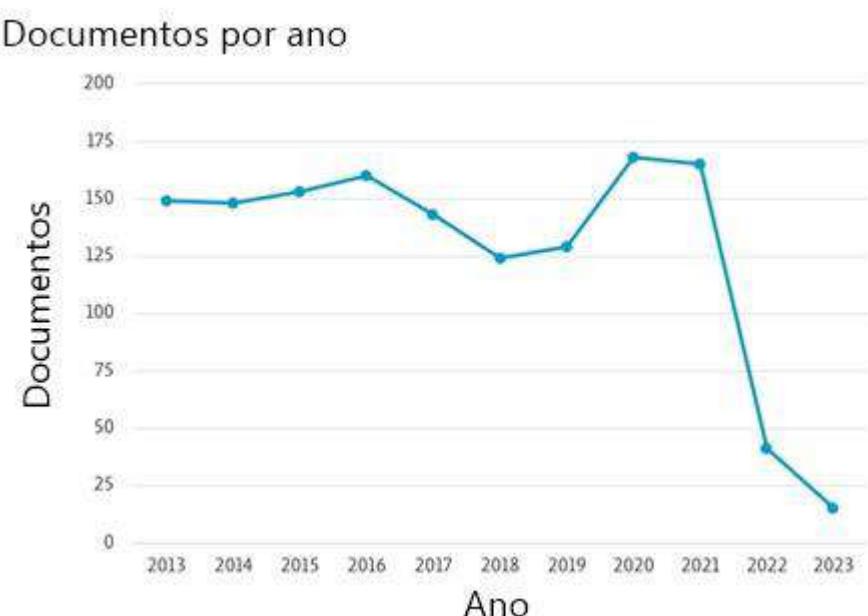


Figura 23: Artigos científicos publicados por ano na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

No ano de 2013 foram publicados 149 artigos, seguido de 148 artigos em 2014, 153 artigos em 2015, 160 artigos em 2016, 143 artigos em 2017, 124 artigos em 2018, 129 artigos em 2019, 168 artigos em 2020, 165 artigos em 2021, 41 artigos em 2022 e 15 artigos no ano de 2023 até a data 06/09/2023.

Na Figura 24, há informações sobre a quantidade de documentos publicados por país ou território, limitado a apenas artigos publicados entre 2013 e 2023.

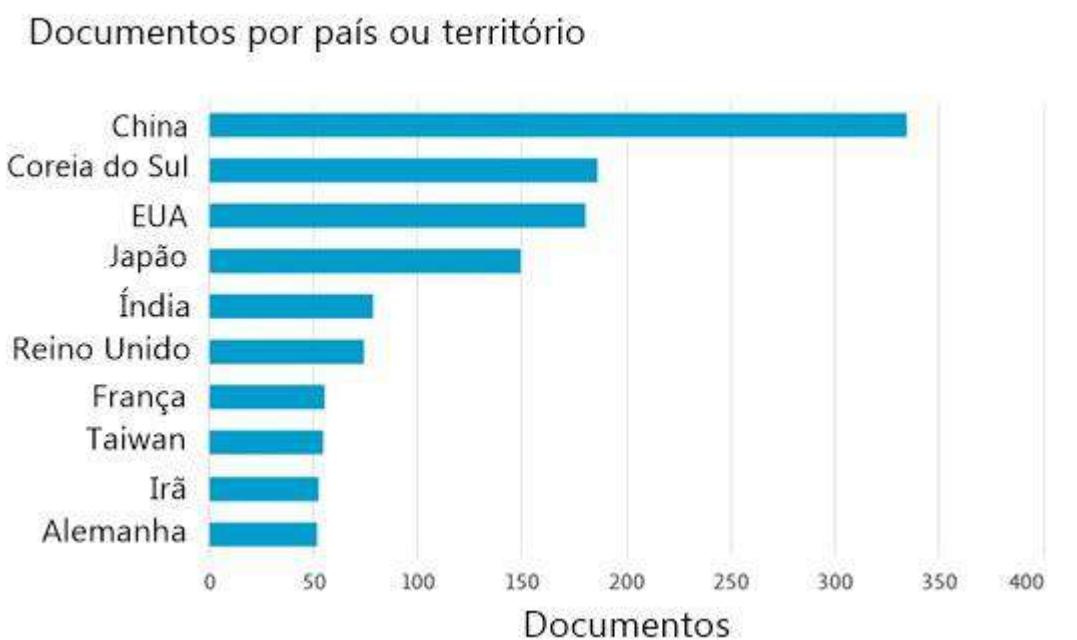


Figura 24: Artigos científicos publicados por país ou território na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

O país com mais artigos publicados é a China, com 334, seguido da Coreia do Sul com 186, Estados Unidos com 180, Japão com 149, Índia com 78, Reino Unido com 74, França com 55, Taiwan com 54, Irã com 52 e Alemanha com 51.

A Figura 25 mostra a quantidade de documentos publicados por cada autor, limitando-se apenas a artigos publicados entre 2013 e 2023.

Documentos por autor

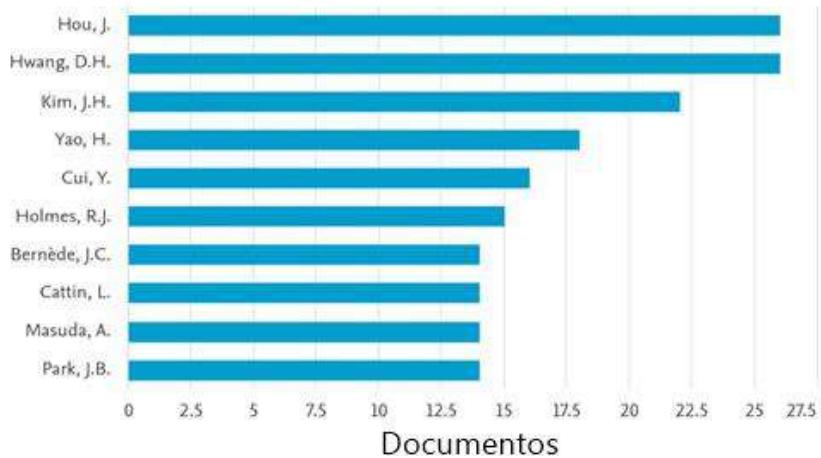


Figura 25: Artigos científicos publicados por autor na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

Os dois autores com mais artigos publicados são Hou, J. e Hwang, D.H. com 26 artigos cada, seguidos de Kim, J.H. com 22; Yao, H. com 18; Cui, Y. com 16; Holmes, R.J. com 15; Bernède, J.C.; Cattin, L.; Masuda, A. e Park, J.B. com 14 artigos publicados.

A Figura 26 apresenta dados sobre os documentos publicados por diferentes fontes por ano, limitado apenas a artigos publicados entre 2013 e 2023.

Documentos por ano em cada fonte de pesquisa

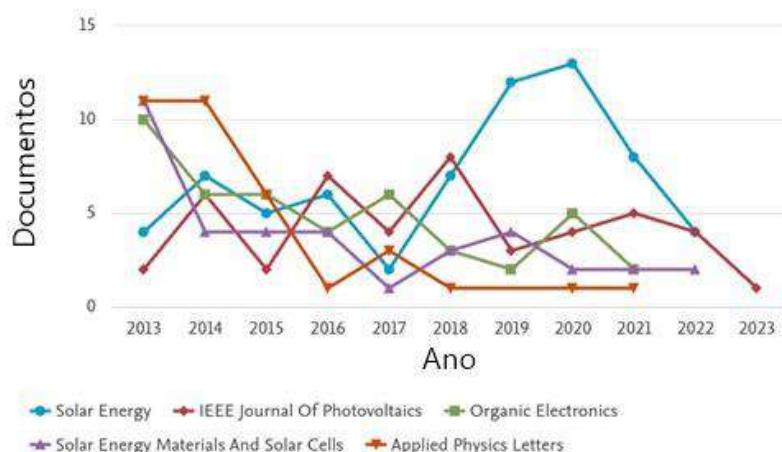


Figura 26: Artigos científicos publicados por fonte na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

Entre 2013 e 2023, foram publicados 68 artigos por Solar Energy, 46 artigos por IEEE Journal Of Photovoltaics, 44 artigos por Organic Electronics, 37 artigos por Solar Energy Materials And Solar Cells e 35 artigos por Applied Physics Letters.

A Figura 27 contém informações sobre a quantidade de documentos publicados por associação, ou seja, entidade que financia pesquisa, limitado a artigos publicados entre 2013 e 2023.

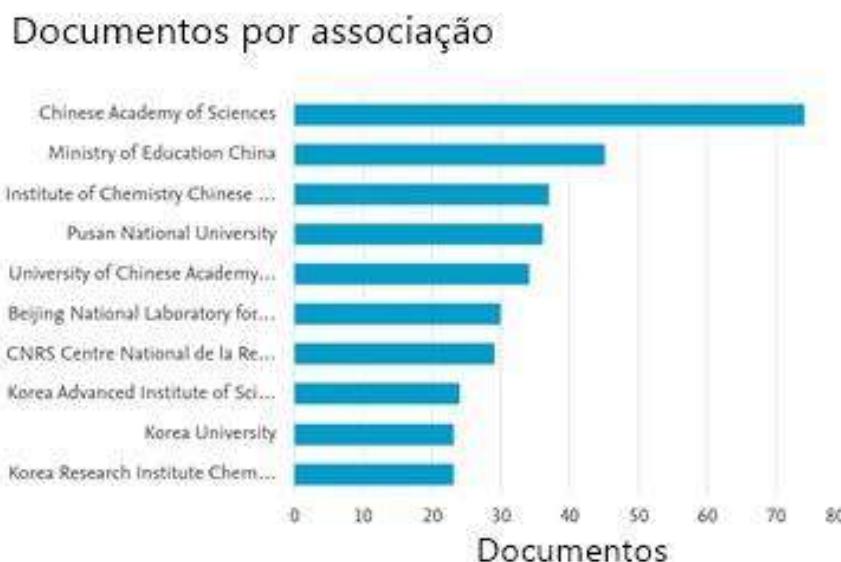


Figura 27: Artigos científicos publicados por associação na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

A associação com mais artigos publicados é a Chinese Academy of Sciences, com 74 artigos, seguido de Ministry of Education China com 45 artigos, Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences com 37 artigos, Pusan National University com 36 artigos, University of Chinese Academy of Sciences com 34 artigos, Beijing National Laboratory for Molecular Sciences com 30 artigos, CNRS Centre National de la Recherche Scientifique com 29 artigos, Korea Advanced Institute of Science and Technology com 24 artigos, Korea University e Korea Research Institute Chemical Technology com 23 artigos publicados.

A Figura 28 apresenta dados de porcentagem dos documentos publicados por área temática, limitado a artigos publicados entre 2013 e 2023.



Figura 28: Artigos científicos publicados por área temática na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

A área temática com mais artigos publicados é Ciência de Materiais com 799 artigos (25.1%), seguido de Engenharia com 607 artigos (19.1%), Física e Astronomia com 568 artigos (17.9%), Energia com 472 artigos (14.8%), Química com 342 artigos (10.7%), Engenharia Química com 149 artigos (4.7%), Ciência Ambiental com 76 artigos (2.4%), Ciência da Computação com 57 artigos (1.8%), Matemática com 52 artigos (1.6%), Bioquímica, Genética e Biologia Molecular com 25 artigos (0.8%) e Outros com 35 artigos publicados (1.1%).

A Figura 29 apresenta informações sobre a quantidade de documentos publicados por patrocinador de financiamento, limitado a artigos publicados entre 2013 e 2023.

Documentos por patrocinador de financiamento

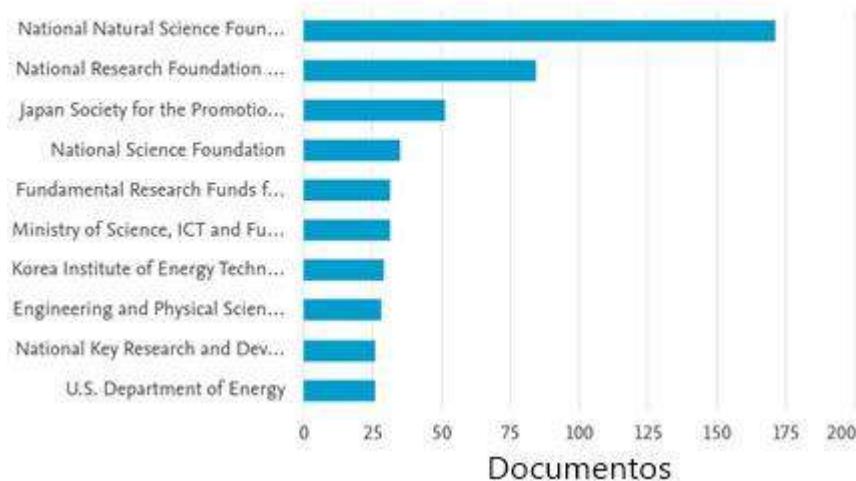


Figura 29: Artigos científicos publicados por patrocinador de financiamento na plataforma Scopus. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma Scopus.

O patrocinador de financiamento com mais artigos publicados é o National Natural Science Foundation of China com 171 artigos, seguido de National Research Foundation of Korea com 84 artigos, Japan Society for the Promotion of Science com 51 artigos, National Science Foundation com 35 artigos, Fundamental Research Funds for the Central Universities e Ministry of Science, ICT and Future Planning com 31 artigos, Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning com 29 artigos, Engineering and Physical Sciences Research Council com 28 artigos, National Key Research and Development Program of China e U.S. Department of Energy com 26 artigos publicados.

Na Análise Meso, os artigos científicos foram categorizados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno das células fotovoltaicas e organizados em taxonomias, devidamente explicadas anteriormente. A Análise Meso de artigos científicos foi baseada nas oito taxonomias propostas, quais sejam: Processo, Produto, Matéria-prima, Propriedade, Algoritmo, Aplicação, Otimização, Equipamento.

Neste estudo, foi elaborada a etapa analítica dos artigos científicos denominada como Análise Micro. Nessa fase do trabalho, cada parte da Análise Meso é detalhada e são, então, identificadas particularidades.

5.3.5. Prospecção de Patentes Depositadas

Utilizando o site da base WIPO, escolheu-se fazer uma pesquisa rápida, a partir de 2013 até o ano de 2023, de forma que foram usadas três combinações de palavras-chaves descritas na Figura 30. As palavras “photovoltaic cell” (célula fotovoltaica) no primeiro campo, especificando para que aparecessem no título e no segundo campo o mesmo termo, “photovoltaic cell”, especificando para que aparecesse no resumo, utilizando os algarismos booleanos OR (“ou”) e AND (“e”) para patentes depositadas.

Palavra-chave: photovoltaic cell in (Title) OR photovoltaic cell in (Abstract); photovoltaic cell in (Title) OR photovoltaic cell (Abstract); photovoltaic cell in (Title) AND photovoltaic cell in (Abstract)
Ano: 2013-2023
Tipo de patente: Solicitada

Figura 30: Palavras-chaves utilizadas para a busca de patentes depositadas encontradas na plataforma WIPO. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

Com esses filtros, foram encontradas na base o total de aproximadamente 500 patentes, dentre os quais foram selecionadas as 30 patentes mais recentes e que fossem de fato relacionadas ao tema.

A análise Macro faz um levantamento da quantidade de patentes depositadas, dos países que apresentam maior número desse tipo de patentes no período estudado, das fontes mais importantes, desde empresas até universidades, ligadas ao conhecimento científico e aos processos de produção de células fotovoltaicas. A priori, a primeira análise trata da evolução do conhecimento tecnológico em número de patentes depositadas analisadas por ano, conforme pode ser observado na Tabela 9. Pode-se verificar que, no intervalo de 2013 a 2023, houve um interesse significativo por pesquisas voltadas para produção dessas células fotovoltaicas, enfatizando a rota baseada na utilização de matérias-primas renováveis para a obtenção de produtos ambientalmente corretos.

Tabela 9: Resposta dos filtros de pesquisa durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas.

Countries	Applicants	Inventors	IPC code	Publication Dates
China 225	HANZHONG BADU YANGJIANG TECH CO LTD	THE INVENTOR HAS WAIVED THE RIGHT TO BE MENTIONED	H02S	279 2014 11
Republic of Korea 14	SUZHOU TALESUN SOLAR TECH CO LTD	LIU YIFENG	H01L	102 2015 21
United States of America 14	KABUSHIKI KAISHA TOYOTA JIDOSHOKKI	ZHU LANFEN	F24S	81 2016 30
PCT 13	TOYOTA JIDOSHO KABUSHIKI KAISHA	CAI XIA	B08B	52 2017 26
Japan 5	ZHEJIANG OUYA PHOTO ELECTRIC TECH CO LTD	CAO HAIBO	F21V	12 2018 61
Canada 3	ANHUI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECH	LU WENHUA	H02J	11 2019 50
India 3	HUIZHOU LAIHUI CLEANING EQUIPMENT CO LTD	NI ZHICHUN	F21S	9 2020 68
United Kingdom 2	JIANGSU MINGYAO PHOTOVOLTAIC TECH CO LTD	WU ZHEN	F21W	8 2021 51
European Patent Office 1	MORGAN SOLAR INC	HEROTAKA INABA	G06Q	7 2022 54
France 1	QINGDAO LIANHE ZHIZAO TECH CO LTD	LIU JUN	F21Y	6

Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

A análise Macro está relacionada com a série histórica de publicações, os países que apresentaram o maior número de patentes depositadas no período estudado e os mais importantes jornais, universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento de células fotovoltaicas. A primeira análise é a evolução da produção em número de patentes depositadas por país, conforme mostrado na Figura 31.

A Figura 31 apresenta dados sobre a quantidade de patentes publicadas por país, se limitando apenas a patentes publicadas entre os anos de 2013 a 2023. Essa análise temporal mostra um período que coincide com o desenvolvimento de matérias-primas renováveis como soluções alternativas às matérias-primas de origem fóssil.

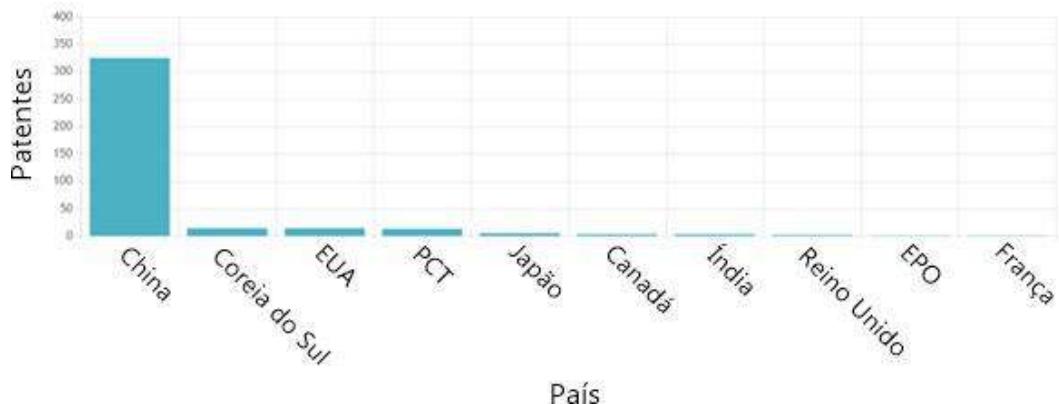


Figura 31: Principais países citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

Os inventores com mais patentes depositadas são Liu Yifeng com 11 patentes, Zhu Lanfen com 8, Cai Xia com 5 patentes, Cao Haibo com 5 patentes, Lu Wenhua com 5 patentes, Ni Zhichun com 5 patentes, Wu Zhen com 5 patentes, Hirotaka Inaba com 4 patentes e Liu Jun com 4 patentes.

Quando considerado o tipo de autor (universidade, instituto de pesquisa, empresas), nota-se que a maioria das publicações foi realizada por empresas e algumas universidades, conforme apresentado nas Figura 32 e Figura 33.

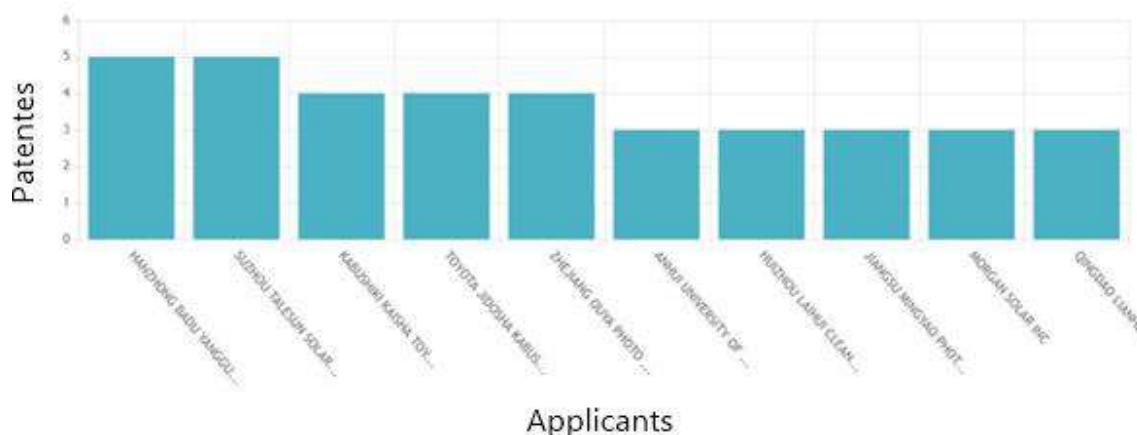


Figura 32: Principais applicants citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

A associação com mais patentes depositadas publicadas é a Hanzhong Badu Yangguang Tech Co Ltd com 5 patentes, Suzhou Talesun Solar Tech Co Ltd com 5 patentes, Kabushiki

Kaisha Toyota Jidoshokki Com 4 Patentes, Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha com 4 patentes, Zhejiang Ouya Photo Electric Tech Co Ltd com 4 patentes, Anhui University Of Scienceand Tech com 3 patentes, Huizhou Laihui Cleaning Equipment Co Ltd com 3 patentes, Jiangsu Mingyao Photovoltaic Tech Co Ltd com 3 patentes, Morgan Solar Inc com 3 patentes, Qingdao Lianhe Zhizao Tech Co Ltd com 3 patentes.

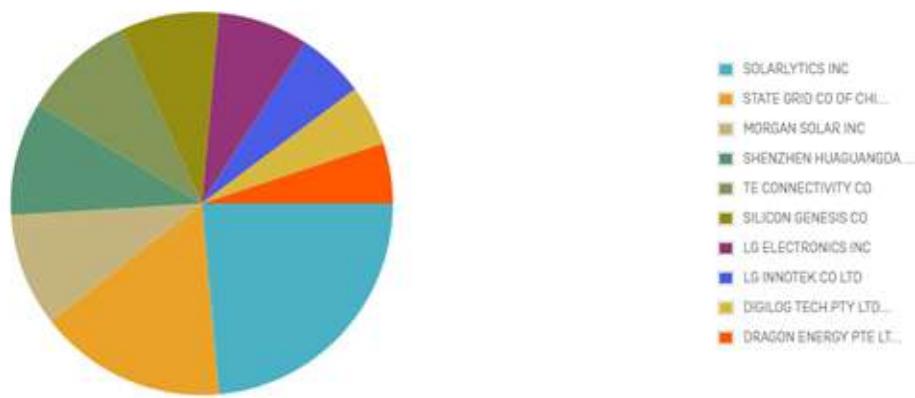


Figura 33: Principais *players* citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas. Fonte: Elaboração própria.

Os *players* com mais patentes depositadas publicadas são Solarlytics Inc, State Grid Co Of China, Morgan Solar Inc, Shenzhen Huaguangda Co, Te Connectivity Co Silicon Genesis Co, Lg Electronics Inc, Lg Innotek Co Ltd, Digilog Tech Pty Ltd, Dragon Energy Pte Lt.



Figura 34: Série histórica obtida durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes depositadas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

No ano de 2014 foram publicadas 15 patentes, seguido de 27 patentes em 2015, 36 patentes em 2016, 29 patentes em 2017, 67 patentes em 2018, 56 patentes em 2019, 74 patentes em 2020, 55 patentes em 2021, 60 patentes em 2022. Esses dados estão demonstrados na Figura 34.

Na análise Meso, as patentes depositadas são categorizadas de acordo com os aspectos mais relevantes em torno das células fotovoltaicas. Esses aspectos foram devidamente identificados na etapa inicial do estudo, cujo foco foi identificar as grandes áreas produtoras dessas células.

Na etapa sequencial deste trabalho, cada taxonomia da análise Meso é detalhada e identificada em função de suas particularidades, como os tipos de Matéria-prima, os Algoritmos, as Aplicações, e as Propriedades.

As patentes depositadas mostram os *players* que estarão atuando em um cenário de médio prazo, que, apesar de também demonstrar um grau avançado do desenvolvimento da tecnologia pelo detentor da patente, como a proteção está em análise, possivelmente o objeto está mais distante de sua fase comercial (BORSCHIVER; LEMOS, 2016). As invenções são direcionadas principalmente à Aplicação e à Propriedade, tanto na otimização como na integração das diferentes tecnologias utilizadas na atualidade.

5.3.6. Prospecção de Patentes Concedidas

Utilizando o site da base WIPO, escolheu-se fazer uma pesquisa rápida, a partir de 2013 até o ano de 2023, de forma que foram usadas três combinações de palavras-chaves descritas na Figura 35. As palavras “photovoltaic cell” (célula fotovoltaica) no primeiro campo, especificando para que aparecessem no título e no segundo campo o mesmo termo, “photovoltaic cell”, especificando para que aparecesse no resumo, foi utilizado os algarismos booleanos OR (“ou”) e AND (“e”) para patentes concedidas.

Palavra-chave: photovoltaic cell in (Title) OR photovoltaic cell in (Abstract); photovoltaic cell in (Title) OR photovoltaic cell (Abstract); photovoltaic cell in (Title) AND photovoltaic cell in (Abstract)
Ano: 2013-2023
Tipo de patente: Concedida

Figura 35: Palavras-chaves utilizadas para a busca de patentes concedidas encontradas na plataforma WIPO. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

Com esses filtros, foram encontradas na base o total de aproximadamente 400 patentes, dentre os quais foram selecionadas as 30 patentes mais recentes e que fossem de fato relacionadas ao tema.

A análise Macro faz um levantamento da quantidade de patentes concedidas, dos países que apresentam maior número desse tipo de patentes no período estudado, das fontes mais importantes, desde empresas até universidades, ligadas ao conhecimento científico e aos processos de produção de células fotovoltaicas. A priori, a primeira análise trata da evolução do conhecimento tecnológico em número de patentes concedidas analisadas por ano, conforme pode ser observado na Tabela 10. Pode-se verificar que, no intervalo de 2013 a 2023, houve um interesse significativo por pesquisas voltadas para produção dessas células fotovoltaicas, enfatizando a rota baseada na utilização de matérias-primas renováveis para a obtenção de produtos ambientalmente corretos.

Tabela 10: Resposta dos filtros de pesquisa durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas.

Countries	Applicants	Inventors	IPC code	Publication Dates
China	325 HANZHONG BADU YANGGUANG TECH CO LTD	THE INVENTOR HAS WAIVED THE RIGHT TO BE MENTIONED	H02S 279	2014 11
Republic of Korea	14 SUZHOU TALESUN SOLAR TECH CO LTD	LIU YIFENG	H01L 102	2015 21
United States of America	14 KABUSHIKI KAISHA TOYOTA JIDOSHOKKI	ZHU LANFEN	F24S 61	2016 30
PCT	13	CAI XIA	B08B 52	2017 28
Japan	5 TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA	CAO HAIBO	F21V 12	2018 61
Canada	3	LU WENHUA	H02J 11	2019 50
India	3 ZHEJIANG OUYA PHOTO ELECTRIC TECH CO LTD	NI ZHICHUN	F21S 9	2020 68
United Kingdom	2 ANHUI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECH	WU ZHEN	F21W 8	2021 51
European Patent Office	1	HIROTAKA INABA	G06Q 7	2022 54
France	1 HUIZHOU LAIHUI CLEANING EQUIPMENT CO LTD	LIU JUN	F21Y 6	
	JIANGSU MINGYAO PHOTOVOLTAIC TECH CO LTD			
	MORGAN SOLAR INC			
	QINGDAO LIANHE ZHIZAO TECH CO LTD			

Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

A análise Macro está relacionada com a série histórica de publicações, os países que apresentaram o maior número de patentes concedidas no período estudado e os mais importantes jornais, universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento de células fotovoltaicas. A primeira análise é a evolução da produção em número de patentes concedidas por país, conforme mostrado na Figura 39.

As Figura 36 apresenta dados sobre a quantidade de patentes publicadas por país, se limitando apenas a patentes publicadas entre os anos de 2013 a 2023. Essa análise temporal mostra um período que coincide com o desenvolvimento de matérias-primas renováveis como soluções alternativas às matérias-primas de origem fóssil.

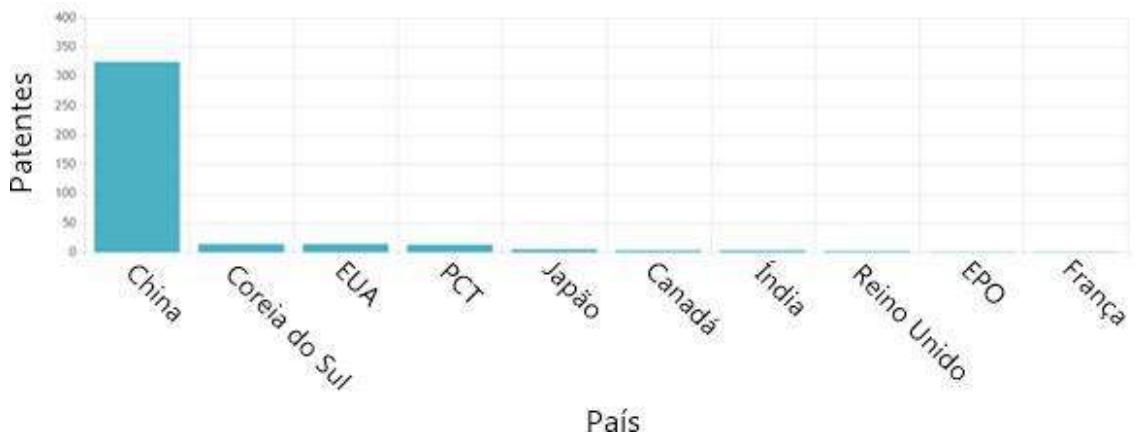


Figura 36: Principais países citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

Os inventores com mais patentes concedidas são Liu Yifeng com 11 patentes, Zhu Lanfen com 8, Cai Xia com 5 patentes, Cao Haibo com 5 patentes, Lu Wenhua com 5 patentes, Ni Zhichun com 5 patentes, Wu Zhen com 5 patentes, Hirotaka Inaba com 4 patentes e Liu Jun com 4 patentes.

Quando considerado o tipo de autor (universidade, instituto de pesquisa, empresas), nota-se que a maioria das publicações foi realizada por empresas e algumas universidades, conforme apresentado nas Figura 37 e Figura 38.

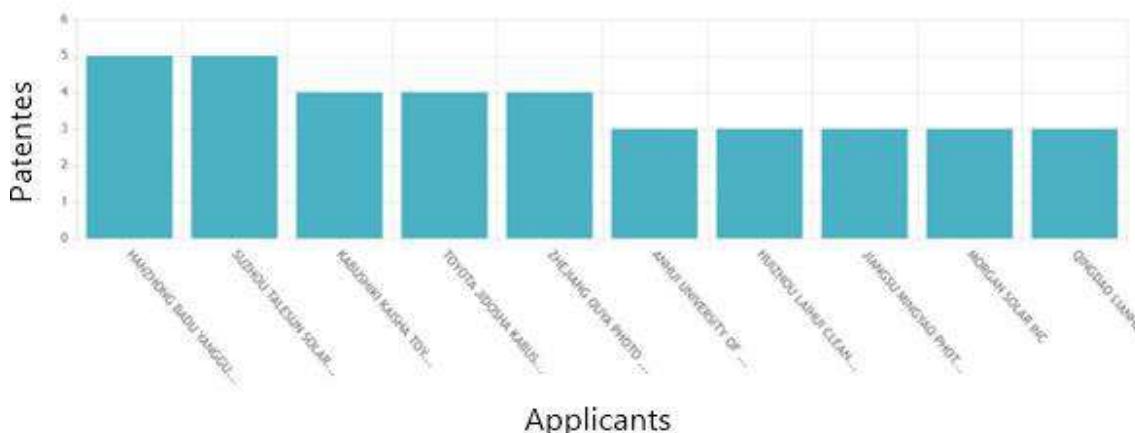


Figura 37: Principais *applicants* citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

A empresa com mais patentes concedidas publicados é a Hanzhong Badu Yangguang Tech Co Ltd com 5 patentes, Suzhou Talesun Solar Tech Co Ltd com 5 patentes, Kabushiki

Kaisha Toyota Jidoshokki Com 4 Patentes, Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha com 4 patentes, Zhejiang Ouya Photo Electric Tech Co Ltd com 4 patentes, Anhui University Of Scienceand Tech com 3 patentes, Huizhou Laihui Cleaning Equipment Co Ltd com 3 patentes, Jiangsu Mingyao Photovoltaic Tech Co Ltd com 3 patentes, Morgan Solar Inc com 3 patentes, Qingdao Lianhe Zhizao Tech Co Ltd com 3 patentes.

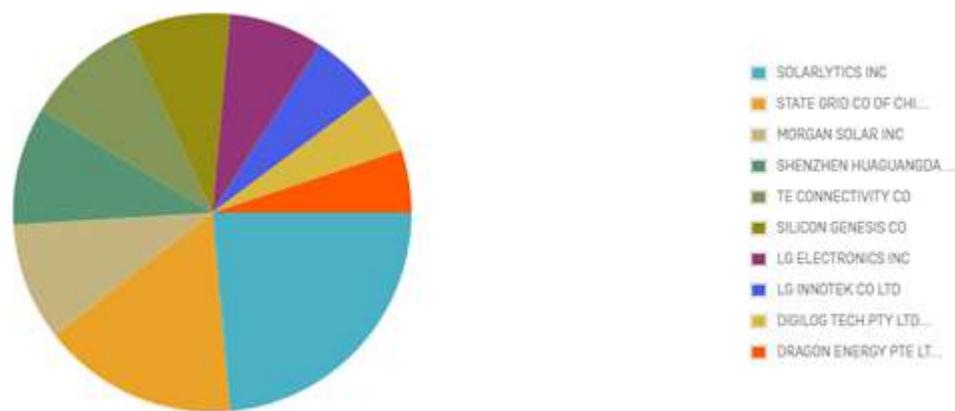


Figura 38: Principais *players* citados durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas. Fonte: Elaboração própria.

Os *players* com mais patentes depositadas publicadas são Solarlytics Inc, State Grid Co Of China, Morgan Solar Inc, Shenzhen Huaguangda Co, Te Connectivity Co Silicon Genesis Co, Lg Electronics Inc, Lg Innotek Co Ltd, Digilog Tech Pty Ltd, Dragon Energy Pte Lt.

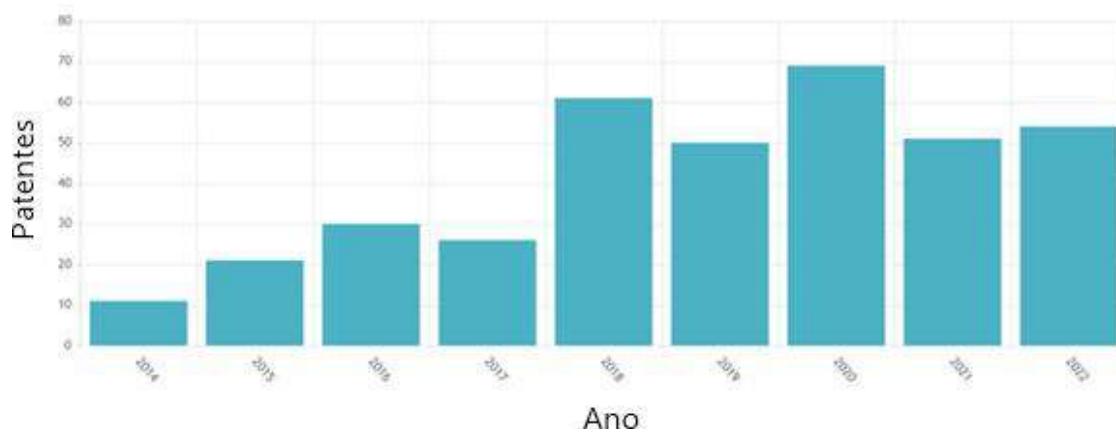


Figura 39: Série histórica obtida durante a análise dos temas célula fotovoltaica e painel solar na plataforma WIPO para patentes concedidas. Fonte: Elaboração própria, com base na plataforma WIPO.

No ano de 2014 foram publicadas 11 patentes, seguido de 21 patentes em 2015, 30 patentes em 2016, 26 patentes em 2017, 61 patentes em 2018, 50 patentes em 2019, 69 patentes em 2020, 51 patentes em 2021, 54 patentes em 2022. Esses dados estão demonstrados na Figura 39.

Na análise Meso, as patentes concedidas são categorizadas de acordo com os aspectos mais relevantes em torno das células fotovoltaicas. Estes aspectos foram devidamente identificados na etapa inicial do estudo, cujo foco foi identificar as grandes áreas produtoras dessas células.

Na etapa sequencial deste trabalho, cada taxonomia da análise Meso é detalhada e identificada em função de suas particularidades, como as categorias de Matéria-prima, os Algoritmos, as Aplicações, e as Propriedades.

As patentes concedidas mostram os *players* que atuarão em um cenário de curto prazo, que demonstra um grau avançado do desenvolvimento da tecnologia pelo detentor da patente e que o objeto está mais próximo de sua fase comercial (BORSCHIVER; LEMOS, 2016). As invenções são direcionadas principalmente à Aplicação e à Propriedade, tanto na otimização como na integração das diferentes tecnologias utilizadas na atualidade.

5.4 ELABORAÇÃO DO ROADMAP TECNOLÓGICO

Na última fase de pós-prospecção, o Roadmap Tecnológico foi desenvolvido seguindo a metodologia descrita no grande tópico deste trabalho. Primeiramente, a análise de artigos científicos permite a avaliação do que está sendo produzido em escala de laboratório e que pode vir a ser encontrado em escala industrial no futuro. Essa análise permite, portanto, a realização de uma previsão das tendências do produto escolhido em longo prazo. Além disso, a análise de patentes permite avaliação das tecnologias que estão mais próximas da aplicação industrial e comercial, sendo as patentes depositadas representantes das tendências em médio prazo e as concedidas, das tendências em curto prazo. Por último, uma pesquisa a respeito do estado atual permite a avaliação do que está sendo efetivamente produzido pela indústria e a avaliação de tendências mercadológicas.

A fim de organizar os estágios temporais, o mapa tecnológico é elaborado da seguinte forma:

1. Estágio Atual (Ano Zero): É caracterizado pelas atividades, tecnologias e parcerias que estão sendo realizadas no momento presente. Essas informações podem ser buscadas

em websites de empresas, mídias especializadas e artigos cujo entendimento são ações presentes no momento atual.

2. Estágio de Curto Prazo: Contém informações obtidas a partir das patentes concedidas.
3. Estágio de Médio Prazo: Nesse caso é utilizada a análise das patentes depositadas.
4. Estágio de Longo Prazo: Nesse estágio são mostrados os *players* que publicaram artigos científicos sobre o assunto por meio de testes, estudos, simulações.

A fim de complementar a caracterização do estágio atual, foi realizada uma análise da produção de células fotovoltaicas utilizando informações obtidas a partir de buscas nos sites das empresas citadas nos artigos e citadas nas patentes.

5.4.1 Taxonomias

As taxonomias obtidas durante as análises Meso e Micro foram organizadas verticalmente em categorias: Processo, Produto, Matéria-prima, Propriedade, Algoritmo, Aplicação, Otimização, Equipamento.

A categoria Matéria-prima, mostrada na Figura 40, contempla as principais matérias-primas utilizadas para a produção ou estudo de células fotovoltaicas. Nessa Meso, encontram-se as Micross: Metal-oxides (óxidos metálicos), Cs₂TiI₆, Carbon nanotubes (nanotubos de carbono), Organometallic perovskites (organometálicos de perovskita), Cu₂ZnSnS₄ (CZTS), Metal foam (espuma metálica), Phase change materials ou PCM (materiais de mudança de fase), Silicon cells (células de silício), PET (politeftalato de etileno), 2-hydroxyethyl acrylate ou HEA (acrilato de hidroxietila), Organic photovoltaics (fotovoltaicas orgânicas), c-Si Solar Cells (células solares de silício cristalino).

Matéria-prima	Metal-oxides
	Cs ₂ TiI ₆
	Carbon nanotubes
	Organometallic perovskites
	Cu ₂ ZnSnS ₄ (CZTS)
	Metal foam
	Phase change materials
	Silicon cells
	PET
	2-hydroxyethyl acrylate
	Organic photovoltaics
	c-Si Solar Cells

Figura 40: Análise Meso Taxonomia “Matéria-prima”. Fonte: Elaboração própria.

A categoria Propriedade, mostrada na Figura 41, contempla as principais propriedades utilizadas para a produção ou estudo de células fotovoltaicas. Nessa Meso, encontram-se as Micros: Kelvin probe force Microscopy ou KPFM (microscopia de força com sonda Kelvin), Acoustic excitation (excitação acústica), Cooling performance (desempenho de resfriamento), Electroluminescence (eletroluminescência), Optical sensors (sensores ópticos), Semiconductor doping (dopagem em semicondutor), X-ray diffraction (difração de raios-X), Viscosity effects (efeitos de viscosidade), Beam irradiance (incidência de raios solares), Laser wireless power transmission ou WPT (transmissão de energia sem fio via laser), Charge carrier lifetime, Reflective film (filme reflexivo), High transmittance (alta transmitância), Quantum wells (poço quântico), Semiconductor superlattice (superrede em semicondutor), Color perception (percepção das cores), Heat Dissipation (dissipação de calor).

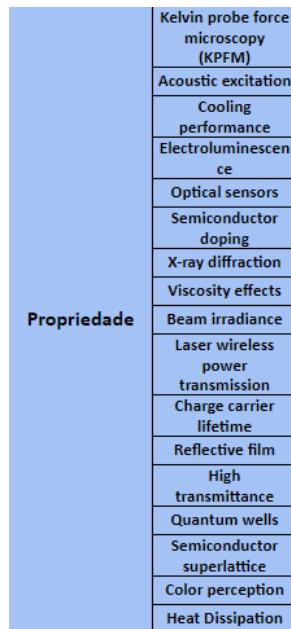


Figura 41: Análise Meso Taxonomia “Propriedade”. Fonte: Elaboração própria.

A categoria Aplicação, mostrada na Figura 42, contempla as principais aplicações utilizadas para a produção ou estudo de células fotovoltaicas. Nessa Meso, encontram-se as Micros: Serpentine reentrant Microchannels ou SRM (serpentina de microcanais reentrantes), Sistemas de transferência e geração de energia, Painel Solar, Têxtil e Roupas, Thermally regenerative ammonia Battery ou TRAB (bateria de amônia termicamente regenerativa), Water Storage (armazenamento de água), Snow Cleaning (remoção de neve).

Aplicação	Serpentine reentrant microchannels
	Sistemas de transferência e geração de energia
	Painel Solar
	Têxtil e Roupas
	Thermally regenerative ammonia battery
	Water Storage
	Snow Cleaning

Figura 42: Análise Meso Taxonomia “Aplicação”. Fonte: Elaboração própria.

A categoria Produto, mostrada na Figura 43, contempla os principais produtos utilizados para a produção ou estudo de células fotovoltaicas. Nessa Meso, encontram-se as Micros: Transparent photovoltaics ou TPVs (células fotovoltaicas transparentes), Eleven-level packed U cell ou PUC.

Produto	Transparent photovoltaics (TPVs)
	Eleven-level packed U cell (PUC)

Figura 43: Análise Meso Taxonomia “Produto”. Fonte: Elaboração própria.

A categoria Algoritmo, mostrada na Figura 44, contempla as principais aplicações utilizadas para a produção ou estudo de células fotovoltaicas com foco nos algoritmos ou simulações matemáticas. Nessa Meso, encontram-se as Micros: High-concentration photovoltaic system, Hyperboloid mirrors, Triple-junction solar cell (célula solar de tripla junção), Parameter estimation (estimação de parâmetros), Single diode model (modelo de um diodo), Timing circuits (análise de tempo dos circuitos), Double-diode photovoltaic model (modelo de dois diodos), Wind driven-based fruit fly optimization algorithm, Alpha-particle detection (detecção de partículas alfa), Drift-diffusion model ou DDM, Monte Carlo method (método de Monte Carlo), Network graph (diagrama de redes), Marine predators algorithm ou MPA.

Algoritmo
High-concentration photovoltaic system
Hyperboloid mirrors
Triple-junction solar cell
Parameter estimation
Single diode model
Timing circuits
Double-diode photovoltaic model
Wind driven-based fruit fly optimization algorithm
Alpha-particle detection
Drift-diffusion model
Monte Carlo method
Network graph
Marine predators algorithm

Figura 44: Análise Meso Taxonomia “Algoritmo”. Fonte: Elaboração própria.

As categorias Equipamento, Processo e Otimização foram agrupadas por não possuírem Meso. Durante a análise, os equipamentos, processos e métodos de otimização não foram citados ou foram muito específicos tendo em vista os objetivos deste trabalho, então suas Micro foram descartadas durante a elaboração dos mapas.

5.4.2 Roadmap Tecnológico Completo

A coluna do Roadmap apresenta os logotipos dos *players* que produziram os artigos e patentes estudados. Os *players* que produziram artigos ou patentes em colaboração foram aglomerados em *clusters* de parceira, enquanto os *players* que apresentaram correspondência de foco tecnológico foram aglomerados em *clusters* de foco.

A Figura 45 mostra o Roadmap Tecnológico completo.

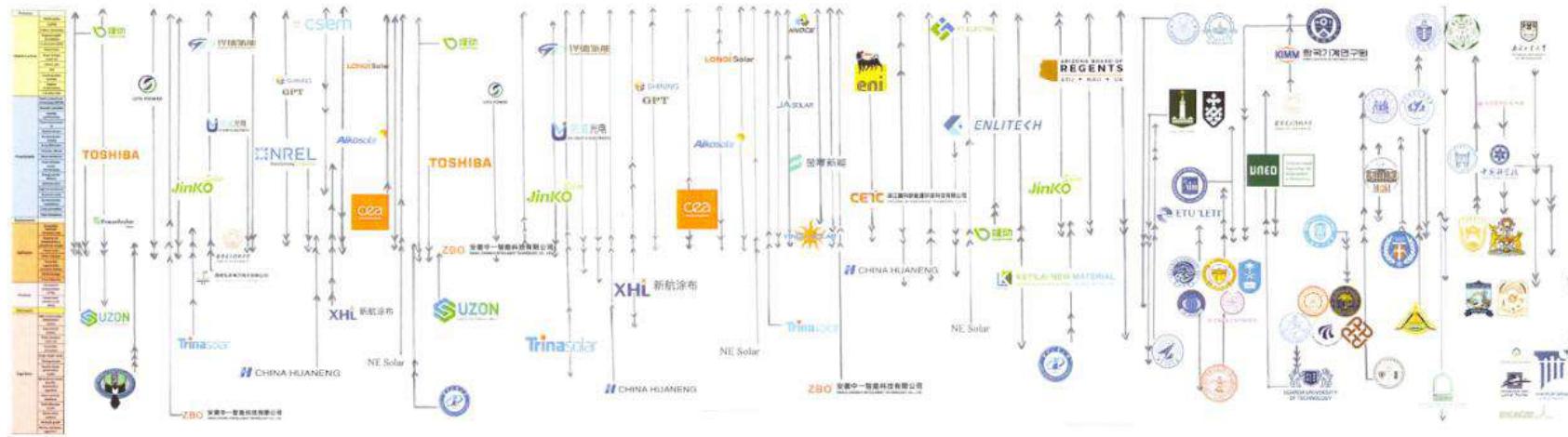


Figura 45: Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas completo. Fonte: Elaboração própria.

5.4.3 Estágio Atual

O Estágio Atual (Ano Zero), ilustrado pela Figura 46, apresenta os principais *players* e parcerias que realizam alguma atividade na produção de células fotovoltaicas no momento presente.

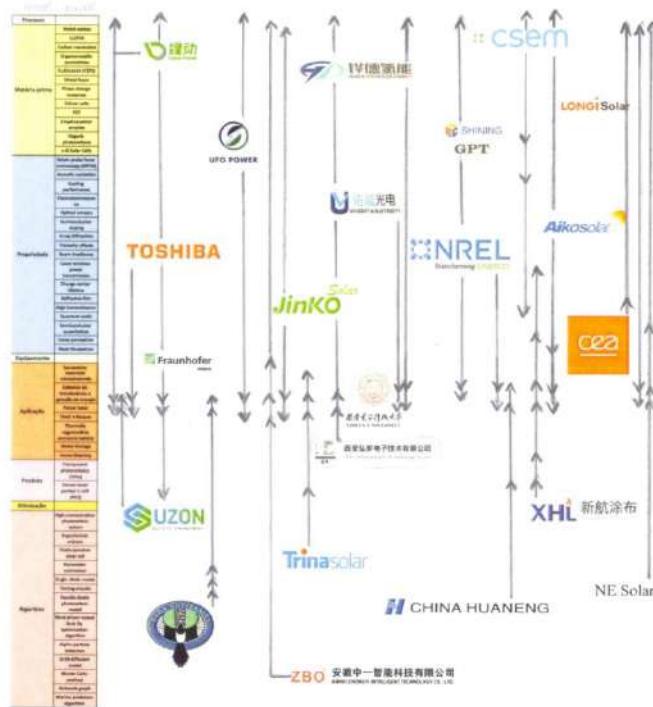


Figura 46: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Estágio Atual (Ano Zero). Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, percebe-se que Aplicação, Produto e Processo são os principais focos das empresas neste momento, sendo as Micros “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar” as subcategorias que mais recebem destaque no Roadmap. Quanto aos produtos, “Transparent photovoltaics (TPVs)” e “Eleven-level packed U cell (PUC)” aparecem com menor frequência.

Pode-se destacar inúmeros *clusters* formados pelas empresas que trabalham na produção de células fotovoltaicas, tendo como foco a “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar”, principalmente no mercado chinês. Como a produção de células fotovoltaicas ainda não se encontra consolidada no mundo inteiro, as informações obtidas pelos websites das empresas se encontram muitas vezes incompletas, pelo fato de que muitas empresas estão mais focadas em se consolidar no mercado interno antes de investir em exportação.

As empresas Aiko, TrinaSolar e LongiSolar, três empresas chinesas, se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas. Também pode-se citar a empresa japonesa Toshiba.

Contudo, é possível ver também no Roadmap a presença de uma universidade chinesa, Xidian University, em parceria com a empresa Xi'an Fenghuo Electronic Technology Co., representando o único *cluster* de parceria neste estágio temporal, e uma universidade japonesa, Saga University.

Commissariat Energie Atomique (França), Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS (Alemanha), National Renewable Energy Laboratory (EUA) e Centre Suisse d'électronique et de Microtechnique (Suíça) são pontos fora da Ásia de produção de células fotovoltaicas.

5.4.4 Curto Prazo

O Estágio de Curto Prazo do Roadmap tecnológico da produção de células fotovoltaicas é apresentado na Figura 47. A análise deste período foi realizada com base em patentes concedidas a partir das quais foram identificados os principais *players* do setor.

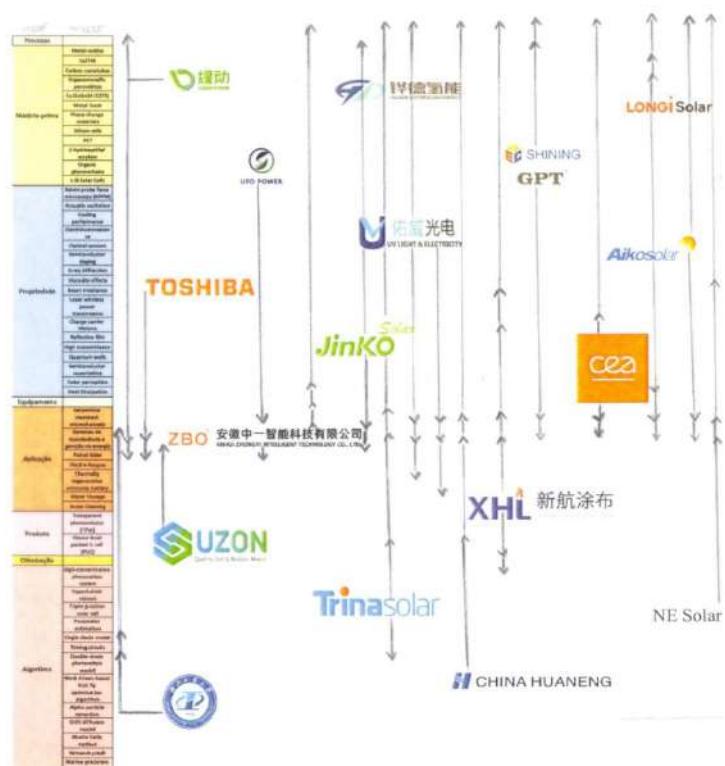


Figura 47: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Curto Prazo. Fonte:

Elaboração própria.

De um modo geral, percebe-se que Aplicação, Produto e Processo são os principais focos das empresas nesse momento, sendo as Micros “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar” as subcategorias que mais recebem destaque no Roadmap. Quanto aos produtos, “Transparent photovoltaics (TPVs)” e “Eleven-level packed U cell (PUC)” aparecem com menor frequência.

As subcategorias que apresentam o envolvimento do maior número de *players* são “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar”. Dos 17 *players*, todos fazem investimentos nessas subcategorias.

Nota-se que a maioria dos *players* no curto prazo são empresas, sendo a universidade chinesa Hubei University of Technology a única universidade presente nessa região do Roadmap.

As empresas Aiko, TrinaSolar e LongiSolar, três empresas chinesas, se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas e são as empresas que mais se destacam em participação em diferentes subcategorias. Também pode-se citar a empresa japonesa Toshiba. A universidade chinesa Hubei University of Technology é o único *player* que apresenta participação em Algoritmo.

Pode-se destacar inúmeros *clusters* formados pelas empresas que trabalham na produção de células fotovoltaicas, tendo como foco a “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar”, principalmente na China. Como a produção de células fotovoltaicas ainda não se encontra consolidada no mundo inteiro, as informações obtidas pelos websites das empresas se encontram muitas vezes incompletas, pelo fato de que muitas empresas estão focadas apenas no mercado interno.

É possível ver também no Roadmap que a Commissariat Energie Atomique, na França, é o único *player* fora da Ásia com patentes concedidas no período para células fotovoltaicas.

5.4.5 Médio Prazo

A Figura 48 mostra a região referente ao Estágio de Médio Prazo do Roadmap tecnológico da produção de células fotovoltaicas. A análise deste período foi realizada a partir de patentes depositadas e, na imagem, são apresentados os principais *players* identificados.

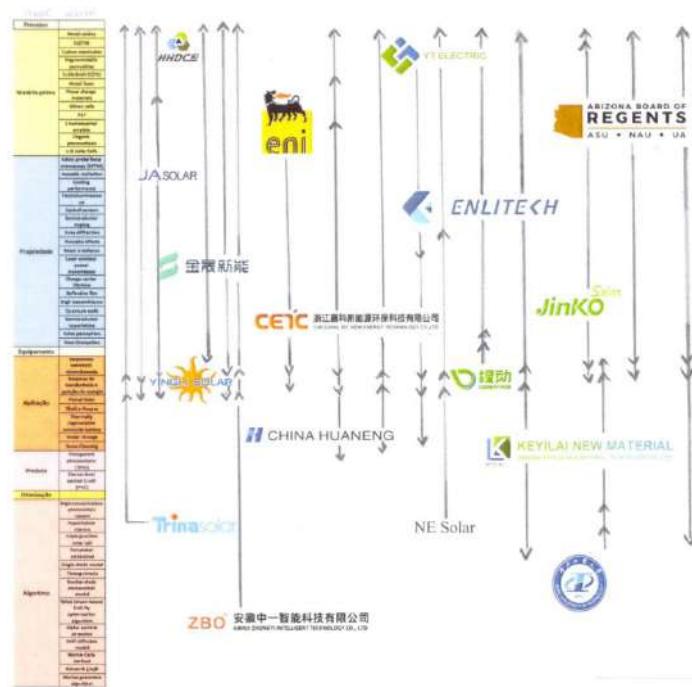


Figura 48: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Médio Prazo. Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, percebe-se que Aplicação, Matéria-prima e Processo são os principais focos das empresas neste momento, sendo as Micros “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar” as condições que mais recebem destaque no Roadmap.

A subcategoria que apresenta o envolvimento do maior número de *players* é “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar”. Dos 17 *players*, todos fazem investimentos nessa subcategoria.

Nota-se que a maioria dos *players* no médio prazo são empresas, sendo a universidade chinesa Hubei University of Technology e a universidade estadunidense Arizona State University as únicas universidades presentes nessa região do Roadmap.

As empresas Jinko e TrinaSolar, duas empresas chinesas, se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas e são as empresas que mais se destacam em participação em diferentes subcategorias.

Pode-se destacar inúmeros *clusters* formados pelas empresas que trabalham na produção de células fotovoltaicas, tendo como foco a “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar”, principalmente na China. Como a produção de células fotovoltaicas ainda não se encontra consolidada no mundo inteiro, as informações obtidas pelos websites das empresas

se encontram muitas vezes incompletas, pelo fato de que muitas empresas estão mais focadas em se consolidar no mercado interno antes de investir em exportação.

É possível ver também no Roadmap que a Arizona Board of Regents on behalf of Arizona State University, nos Estados Unidos da América, e ENI S.P.A., na Itália, são os únicos *players* fora da Ásia com patentes solicitadas no período para células fotovoltaicas. Destaca-se também o *player* Enli Technology Co., no Taiwan, como a única empresa asiática fora da China nesse estágio.

5.4.6 Longo Prazo

No Roadmap de Estágio de Longo Prazo mostrado na Figura 49 é observado a direção das pesquisas sobre células fotovoltaicas. Conforme o esperado nesse estágio, as universidades dominam os estudos sobre a temática células fotovoltaicas.

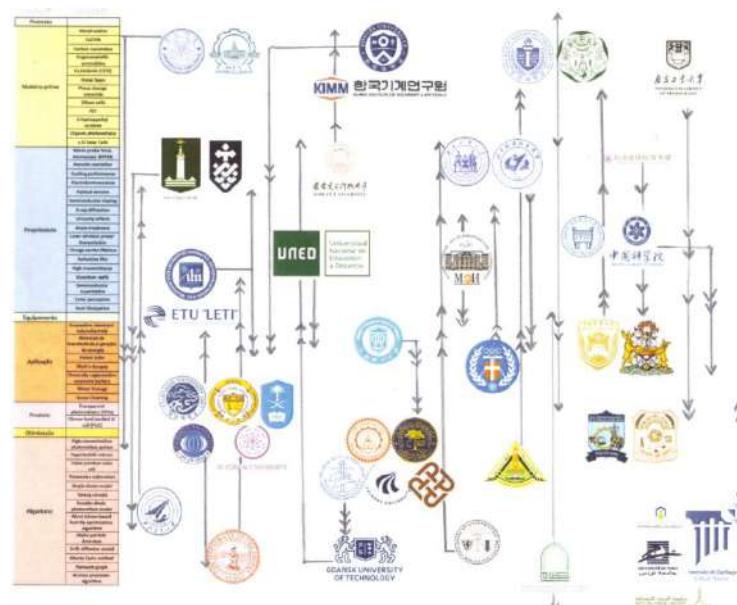


Figura 49: Recorte Roadmap Tecnológico de Células Fotovoltaicas Longo Prazo. Fonte: Elaboração própria.

A partir de uma rápida análise, fica claro que a maioria dos *players* tem produções científicas relacionadas a Matéria-prima, Propriedade e Aplicação. Durante a fase prospectiva foi identificado um grande número de matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de células fotovoltaicas, havendo destaque para o silício cristalino e óxidos metálicos.

A categoria Algoritmo é estudada em larga escala. É importante que estudos sejam feitos nessa categoria pois a partir de algoritmos e simulações matemáticas é possível prever o

comportamento das células fotovoltaicas em determinado espaço de tempo de forma a otimizar o seu funcionamento, bem como entender algumas propriedades de maneira estatística.

Durante a elaboração do Roadmap foi percebido que algumas universidades, algumas já em parceria com outras universidades e empresas, estão trabalhando nas mesmas linhas de pesquisa, formando assim os chamados *clusters*. A universidade chinesa China Agricultural University e a universidade canadense The University of Western Ontario formam um dos *clusters* de parcerias vistos no Roadmap.

A universidade Tainan University of Technology, no Taiwan, é o único *player* que tem pesquisas sobre o uso de células fotovoltaicas aplicadas ao setor têxtil.

Diferentemente dos outros estágios, os estudos a longo prazo envolvem diversos países, mesmo que a China continue sendo o principal local de inovação tecnológica para células fotovoltaicas. Sendo assim, pode-se notar que há universidades no Extremo Oriente (China, Coréia do Sul, Japão, Taiwan), Oriente Médio (Arabia Saudita), Oceania (Austrália, Nova Zelândia), África (Tunísia, Egito), América do Norte (Estados Unidos da América, Canadá), Europa (Rússia, Bielorrússia) trabalhando para o desenvolvimento de novos estudos que envolvem células fotovoltaicas.

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As atividades dos *players* que mais direcionam esforços, em termos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) a longo prazo, por meio da publicação de artigos científicos, para a produção de células fotovoltaicas estão ligadas aos desenvolvimentos de algoritmos e simulações matemáticas que simulem os sistemas de transferência de energia, bem como outras propriedades como semicondução, presente nas células fotovoltaicas, possibilitando um embasamento científico para uma otimização da produção e do processo de confecção dessas células fotovoltaicas.

De modo geral, percebe-se que Aplicação, Produto e Processo são os principais focos das empresas, centros de pesquisa e universidades, sendo as Micros “Sistemas de transferência e geração de energia” e “Painel Solar” as subcategorias que mais recebem destaque no Roadmap. Quanto aos produtos, “Transparent photovoltaics (TPVs)” e “Eleven-level packed U cell (PUC)” aparecem com menor frequência. Especialmente para o estágio de longo prazo, as categorias Algoritmo e Matéria-prima, com diversificação de matérias-primas utilizadas, desde o tradicional silício cristalino ao PET e óxidos metálicos, são estudadas em larga escala. A partir

de algoritmos e simulações matemáticas é possível prever o comportamento das células fotovoltaicas em determinado espaço de tempo de forma a otimizar o seu funcionamento, bem como entender algumas propriedades de maneira estatística e por isso é importante realizar estudos massivos nessa área.

No estágio atual, pode-se destacar, três empresas chinesas, Aiko, TrinaSolar e LongiSolar, que se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas, principalmente no mercado interno chinês. Contudo, foi possível observar a presença de uma universidade chinesa, Xidian University, em parceria com a empresa Xi'an Fenghuo Electronic Technology Co., representando o único *cluster* de parceria neste estágio temporal, e uma universidade japonesa, Saga University. Commissariat Energie Atomique (França), Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS (Alemanha), National Renewable Energy Laboratory (EUA) e Centre Suisse d'électronique et de Microtechnique (Suíça) são pontos fora da Ásia de produção de células fotovoltaicas.

No estágio de curto prazo, nota-se que a maioria dos *players* são empresas, sendo a universidade chinesa Hubei University of Technology a única universidade presente nessa região do Roadmap. As empresas Aiko, TrinaSolar e LongiSolar, três empresas chinesas, se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas e são as empresas que mais se destacam em participação em diferentes subcategorias. É possível observar também no Roadmap que a Commissariat Energie Atomique, na França, é o *player* fora da Ásia com patentes concedidas no período estudado para células fotovoltaicas.

No estágio de médio prazo, nota-se que a maioria dos *players* no médio prazo são empresas, sendo a universidade chinesa Hubei University of Technology e a universidade estadunidense Arizona State University as únicas universidades presentes nessa região do Roadmap. As empresas Jinko e TrinaSolar, duas empresas chinesas, se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas e são as empresas que mais se destacam em participação em diferentes subcategorias. É possível ver também no Roadmap que a Arizona Board of Regents on behalf of Arizona State University, nos Estados Unidos da América, e ENI S.P.A., na Itália, são os únicos *players* (empresas) fora da Ásia com patentes solicitadas no período para células fotovoltaicas. Destaca-se também o *player* Enli Technology Co., no Taiwan, como a única empresa asiática fora da China nesse estágio.

No estágio de longo prazo, foi percebido que algumas universidades, algumas já em parceria com outras universidades e empresas, estão trabalhando nas mesmas linhas de

pesquisa, formando assim os chamados *clusters*. A universidade chinesa China Agricultural University e a universidade canadense The University of Western Ontario formam um dos *clusters* de parcerias vistos no Roadmap. A universidade Tainan University of Technology, no Taiwan, é o único *player* que tem pesquisas sobre o uso de células fotovoltaicas aplicadas ao setor têxtil. Diferentemente dos outros estágios, os estudos a longo prazo envolvem diversos países, mesmo que a China continue sendo o principal local de inovação tecnológica para células fotovoltaicas. Sendo assim, pode-se notar que há universidades no Extremo Oriente (China, Coréia do Sul, Japão, Taiwan), Oriente Médio (Arabia Saudita), Oceania (Austrália, Nova Zelândia), África (Tunísia, Egito), América do Norte (Estados Unidos da América, Canadá), Europa (Rússia, Bielorrússia) trabalhando para o desenvolvimento de novos estudos que envolvem células fotovoltaicas.

Após a análise dos estágios temporais, fica claro que as empresas Aiko, TrinaSolar e LongiSolar se destacam como as principais empresas de produção e comércio de células fotovoltaicas e são as empresas que mais se destacam em participação em diferentes subcategorias, principalmente em Aplicação, Matéria-prima e Processo. O foco das empresas se encontra na produção de painéis solares, tanto para o mercado interno quanto externo. Esses três *players* se repetem ao longo das etapas de estágio atual, curto prazo e médio prazo, porém não estão presentes no estágio de longo prazo, o qual é dominado majoritariamente por universidades ao redor do mundo.

6. CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo teve como objetivo a elaboração de um Roadmap Tecnológico referente ao tema de células fotovoltaicas. O Roadmap Tecnológico é uma importante técnica de prospecção tecnológica que permite um mapeamento dinâmico de determinado produto, matérias-primas, propriedades, tecnologia, equipamentos, de forma a subsidiar o planejamento estratégico e gerenciamento tecnológico de uma organização do setor. Portanto, o Roadmap Tecnológico elaborado auxilia na análise de futuro das células fotovoltaicas, buscando identificar as principais tendências tecnológicas e mercadológicas relacionadas ao tema.

O mapa obtido após a realização de todo o estudo conseguiu atingir um resultado satisfatório, possibilitando a visualização dos principais *players* do setor e suas tendências tecnológicas ao longo dos eixos temporais.

Os bancos de dados utilizados forneceram o material necessário para a análise pretendida. Somado às fontes de dados utilizadas, tanto Scopus quanto WIPO, as taxonomias definidas se mostraram consistentes com a análise pretendida e os dados retirados das patentes e artigos permitiram identificar tecnologias e produtos referentes às células fotovoltaicas.

A metodologia de prospecção e os documentos estudados se mostraram, de forma qualitativa e quantitativamente, consistentes com o objetivo de elaborar o Roadmap e identificar as tendências e capazes de mostrar quais empresas e instituições vêm mostrando maior interesse no tema abordado. Observou-se que empresas de grande renome, quais sejam Toshiba e TrinaSolar, seguem estudando o produto e criando novos produtos, processos e soluções envolvendo células fotovoltaicas e painéis solares.

A partir do Roadmap Tecnológico, é notável o interesse de universidades e empresas estrangeiras nas tecnologias envolvendo células fotovoltaicas. Embora polos tradicionais como Estados Unidos e Europa tenham sido identificados durante a análise, observou-se o grande potencial dos países asiáticos, como China, Coréia do Sul e Japão, a respeito da temática. A China, particularmente, mostrou-se um importantíssimo *player* nos desenvolvimentos tecnológicos em todos os estágios temporais, apontando para uma possível mudança de referencial tecnológico de 2013 a 2023.

Com base nos dados expostos, a produção científica, observada pela análise de artigos científicos, em relação ao tema “Células Fotovoltaicas” apresenta crescimento desde 2013,

demonstrando interesse do mercado e de demanda. A China também se destacou pela maior publicação de artigos, seguido pela Coréia do Sul, Estados Unidos, Canadá e países do Oriente Médio e países da África que, desse modo, estão em fase de desenvolvimento da tecnologia.

A partir de 2013, por outro lado, o país que mais se destacou como o maior depositante de patentes (e famílias de patentes) também foi a China, e, por isso, o país se colocou em um estágio mais avançado na tecnologia de produção de células fotovoltaicas. É possível apontar outros polos de destaque, porém em escala menor, como a Coréia do Sul, Estados Unidos, Japão e Canadá.

Além disso, pode-se perceber o envolvimento maciço de quatro esferas institucionais, Universidade, Governo, Empresa e Centro de Pesquisa, sinalizando as células fotovoltaicas nos modelos de negócios estratégicos como forte tendência. Isto é ratificado pela presença de grandes empresas (como Toshiba, TrinaSolar, Aiko), médias empresas, universidades (como Hubei University e University of Shanghai for Science and Technology), centros de pesquisas (como National Renewable Energy Laboratory e Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS) e instituições governamentais (como Ministry of Natural Resources) no Roadmap Tecnológico.

Durante a pesquisa, foi analisado que países pertencentes à América Latina não se mostraram presentes tanto no âmbito de patentes, depositadas e concedidas, quanto no âmbito da publicação de artigos no intervalo e nas bases de pesquisa escolhidos. Além disso, houve uma pequena estagnação nos pedidos de patentes e publicação de artigos em todo mundo durante os anos de 2019 e 2021 devido a pandemia do COVID-19, afetando até mesmo a principal potência produtora e desenvolvedora de células fotovoltaicas: a China.

Diante do exposto, pode-se inferir que o tema tem grande potencial de desenvolvimento, sendo promissor o investimento diante dos grandes benefícios do uso de fontes renováveis para obtenção de energia elétrica. Apesar de que a tecnologia de produção de células fotovoltaicas ainda está em fase de consolidação em vários pontos do planeta, a energia solar já se mostra de grande interesse global, tornando-se cada vez mais viável economicamente e com tendências ao sucesso tanto na produção quanto na reciclagem, principalmente, de painéis solares.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho também oferece sugestões para elaboração de futuros projetos a partir deste. As sugestões podem ser vistas a seguir.

- Atualização do Roadmap Tecnológico elaborado, de forma a incluir as novas informações acerca do tema e permitir a contínua visualização de tendências para possibilitar tomadas estratégicas de decisão no futuro.
- Complementação da técnica de elaboração do Roadmap Tecnológico com outras ferramentas de prospecção tecnológica. Para auxiliar na obtenção de um resultado que melhor refletirá o panorama futuro, podem ser utilizadas diversas ferramentas como, por exemplo, o estudo de maturidade tecnológica TRL (*Technology Readiness Levels*).
- Aproveitamento do estudo realizado por parte de pesquisadores para a realização de novos projetos em busca de novas matérias-primas ou otimização de materiais já existentes para a confecção de novos painéis fotovoltaicos.
- Realização de uma análise econômica de forma a verificar a viabilidade de implementação das tecnologias e produtos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia solar ultrapassa R\$ 150,7 bilhões em investimentos no Brasil.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/energia-solar-ultrapassa-r-1507-bilhoes-em-investimentos-no-brasil-segundo-absolar/>. Acesso em: 30 out. 2024.

ALDOSOLAR. **Aldo Solar.** Portal de Notícias. 2023. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/forum-de-energia-solar-em-2024/>. Acesso em: 30 out. 2024.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Anual 2023.** 2024. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/>. Acesso em: 30 out. 2024.

AUTOSOLAR. **AutoSolar.** Loja. Disponível em: <https://autosolar.es/>. Acesso em: 30 out. 2024.

AVALANCHE, Avalanche Notícias. **Em Cingapura, construiu a maior usina de energia solar do mundo flutuante.** 2021. Disponível em: <https://avalanchenoticias.com.br/fontes-de-alimentacao-adaptadores-fontes-de-alimentacao/em-cingapura-construiu-a-maior-usina-de-energia-solar-do-mundo-flutuante/>. Acesso em: 30 out. 2024.

BNEF, Bloomberg New Finance. **Energy Transition Investment Trends 2023.** 2023.

BONNET, D.; **Manufacturing of CSS CdTe solar cells,** Thin Solid Films 361-362 (2000) p. 547-552.

BORSCHIVER S., LEMOS A. **Technology Roadmap-planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia.** Brasil: Editora Interciência. No prelo (2016).

BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações.** Projeto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2008.

BRITO, S. S. **Energia solar princípios e aplicações.** Sistema Eletrobrás, 2006. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

CANALSOLAR. **Canal Solar.** 2024. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2024.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **InfoMercado Quinzenal - 299 1ª Edição - Abr/23.** 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/>. Acesso em: 30 out. 2024.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig.** Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CNN. CNN Brasil. **Brasil fica em 6º lugar na geração de energia solar mundial.** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/brasil-fica-em-6o-lugar-na-geracao-de-energia-solar-mundial>. Acesso em: 30 out. 2024.

COELHO, T.; SERRA, J. **Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais.** Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade, Volume 15, número 7. Curitiba–PR, jun/dez-2018.

COMERC. **Energia solar no Brasil e no mundo.** Disponível em: <http://www.panoramacomerc.com.br/?p=2517>. Acesso em: 30 out. 2024.

CRUZ, Nathalia R. **Exposição ambiental ao chumbo: um problema de áreas contaminadas próximas a fábricas de bateria.** Bauru, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (licenciatura - Química) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, 2012.

DIAS, Pablo. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos.** Porto Alegre, 31 de agosto de 2015.

DIENSTMANN, G. **Energia Solar: Uma comparação de tecnologias.** (Diplomação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Departamento de Engenharia Elétrica. 2009.

ELY, F; SWART, J. W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração.** Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), O Setor Elétrico, ed, v. 105, p. 138-139, 2014.

EMBER, Ember Energy. **Global Electricity Review 2023.** 2023.

EPE – Empresa de pesquisa energética. **Balanço energético nacional.** 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico470/Relat%C3%BDrio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

EPE – Empresa de pesquisa energética. **Plano decenal de expansão de energia 2029.** 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

FTHENAKIS, V. M. E. L. P. A. **Electricity from sunlight: photovoltaic systems integration and sustainability - Second Edition.** [S.l.]: Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C. **Photovoltaic Materials: History, Status and Outlook,** Mater. Sci. Eng. R 40 (2003)1 – 46, 2003.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **PVPS Annual Report 2014.** International Energy Agency. Paris, 2014.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA PVPS. IEA PVPS Task 1 -**Strategy PV Analysis and Outreach**. IEA. [S.l.]. 2019. (ISBN 978-3-906042-83-1).

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables Information: Overview**. International Energy Agency. Paris, 2019.

INFOLINK, InfoLink Consulting. **Solar market overview for 2023**. 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Paris, 2016.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; DO ESPÍRITO SANTO, O. C.; SACRAMENTO, T. C. B.; & BRAZ, K. T. M. **Energia solar fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. Engenharias On-line, 1(2), 21-33, 2016.

MOUTINHO, H.R.; DHERE, R.G.; BALLIF, C.; AL-JASSIM, M.M.; AND KAZMERSKI, L.L.; **Alternative procedure for the fabrication of close-spaced sublimated CdTe solar cells**, J. Vac. Sci. Technol. A. 18 (2000).

NELSON, J. **The Physics of Solar Cells**, Imperial College Press, UK, 2003.

NEOSOLAR. Neosolar. Portal de notícias. **Energia Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre**. 2022. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica#o-que-eenergia-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 30 out. 2024.

OCA SOLAR ENERGIA. Oca Solar Energia. **Sistema Fotovoltaico Híbrido: Entenda o Que é e Suas Aplicações**. 2021. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>. Acesso em: 30 out. 2024.

OLIVEIRA, D. B; LEBENSOLD, F.; OLIVEIRA, L. T. **Destinação final das placas fotovoltaicas pós-consumo no Brasil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011.

PHAAL, Robert.; FARRUKH, Clare J. P.; PROBERT, David R. **Technology roadmapping – A planning framework for evolution and revolution**. In: Technological Forecasting and Social Change, 71, pp.5-26, 2004.

PINHO, J. T.; GALDINO M. A.; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=481>. Acesso em: 30 out. 2024.

POPPER, Rafael. **El proceso prospectivo: prácticas y métodos**. In: **The handbook of technology foresight: concepts and practice**, Pime Series on Research and Innovation Policy, 2008.

POR TALSOLAR. Portal Solar. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico.** 2016. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solarfotovoltaico.html>. Acesso em: 30 out. 2024.

POR TALSOLAR. Portal Solar. **Energia solar lidera investimentos em transição energética no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/energia-solar-lidera-investimentos-em-transicao-energetica-no-brasil>. Acesso em: 30 out. 2024.

ROSI SOLAR. **ROSI Solar.** Centro de reciclagem de painéis solares. Disponível em: <https://www.rosi-solar.com/>. Acesso em: 30 out. 2024.

RO SCHIER, S.; Development of procedures for performance measurements and lifetime testing of thin film photovoltaic devices, tese de doutorado, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland), 25 de janeiro de 2002.

RÜTHER, R. Fontes alternativas de energia. In: A. D. A. Montenegro (Ed.). Florianópolis: Fundação de ensino e engenharia de Santa Catarina, 2000.

RÜTHER, R. Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área, LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, 1999.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. Mudanças climáticas e o impacto das cidades, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 84-94, 2011.

SANTOS, D. M.; GUIMARÃES, M. C. S.; SILVA, C. H.; COELHO, G.M. Prospecção tecnológica: experiências recentes no Brasil. In: 22nd International Symposium on Forecasting, 2002, Dublin.

SANTOS, F. D. Que futuro? Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento e Ambiente, Lisboa: Gradiva, novembro 2007.

SANTOS, I. P. Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista (Dissertação), Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Florianópolis, fevereiro de 2009.

SCOPUS. Scopus Advanced Search. Base de dados. Disponível em: <https://www.scopus.com/>. Acesso em: 30 out. 2024.

SOLFACIL. Solfácil. **Painéis Solares com espessura de papel criados por universidade brasileira.** 2023. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/paineis-solares-com-espessura-de-papel-criados-por-universidade-brasileira/>. Acesso em: 30 out. 2024.

TÉCNICA VIÇOSA. Técnica Viçosa. **Instalações elétricas e automação industrial.** Disponível em: <https://www.tecnicavicoso.com/sistemasrega.html>. Acesso em: 30 out. 2024.

THOMAS, R.; GRAINER, T. **Photovoltaic in buildings - a design guide**, Department of trade and industry. Londres, 1999.

TOWNSEND, S.W. **Electrical and optical properties of bias stressed cadmium telluride solar cells**, tese de doutorado, Colorado School of Mines (GoldenColorado, EUA), 8 de dezembro de 2001.

USPTO. **United States Patent and Trademark Office**. Base de dados. Disponível em: <https://www.uspto.gov/>. Acesso em: 30 out. 2024.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações – 1ª edição**. São Paulo: Érica LTDA, 2012.

WERECYCLESOLAR, **We Recycle Solar**. Centro de reciclagem de painéis solares. 2023. Disponível em: <https://werecyclesolar.com/>. Acesso em: 30 out. 2024.

WIPO, World Intellectual Property Organization. **World Intellectual Property Report 2019**. 2019.

WU, X.; DHERE, R.G., ALBIN, D.S. et al.; **High efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells**, NREL/CP – 520 – 31025 (2001).