

345 - ANÁLISE SWOT DE TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES DIRECIONADAS À REALIDADE BRASILEIRA

Lucas Campos Castelo Branco⁽¹⁾

Engenheiro Químico (UFRJ). Atuou como bolsista de Iniciação Científica em pesquisas sobre biodegradação de fármacos e como estagiário em P&D em parceria com a Petrobras. Exerceu liderança no grupo estudantil EQHANDSON, coordenando projetos de reciclagem de água e reestruturação laboratorial. Mestrando em Engenharia Química (UFRJ).

Felipe Sombra dos Santos⁽²⁾

Engenheiro Químico pela PUC-Rio. Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na área de Engenharia de Processos e Meio Ambiente pela PUC-Rio. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Osvaldo Cruz (FIOCRUZ). Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química da UFRJ.

Endereço (1): Centro de Tecnologia – UFRJ – Av. Athos da Silveira Ramos, 149 – Bloco E, Sala 203 – Cidade Universitária – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 21941-909 – Brasil – Tel: +55 (21) 3938-7600 – E-mail: campos.lucas10@yahoo.com.br

RESUMO

Apesar de serem considerados uma forma de energia verde, os painéis fotovoltaicos enfrentam um desafio logístico em relação ao descarte adequado. Com a aproximação do fim da vida útil dos primeiros painéis de primeira geração, é essencial explorar metodologias mais adequadas ao contexto brasileiro, uma vez que essas tecnologias ainda não foram amplamente adotadas. Este estudo analisou métodos de tratamento para reciclagem de módulos fotovoltaicos utilizando a ferramenta de análise SWOT, com foco no cenário econômico brasileiro. Para a metodologia, foi utilizada uma busca bibliométrica. Foram discutidos os três principais métodos de delaminação—térmico, físico e químico—além de outras técnicas disponíveis para a reciclagem de painéis fotovoltaicos. A identificação de cenários foi utilizada para avaliar esses métodos, cruzando os fatores da matriz SWOT para determinar como cada técnica se encaixa em cenários de crescimento, desenvolvimento, manutenção e sobrevivência. O estudo concluiu que o método de tratamento mais adequado para a realidade brasileira é o tratamento térmico, especificamente utilizando a Inchaço Solvotérmico com Decomposição Térmica (SSTD) ou o método Eletrotérmico, selecionados entre 11 possíveis técnicas. Verificou-se que todos os tratamentos químicos e físicos podem gerar algum tipo de efluente ou resíduo tóxico durante o processo. Em contraste, os tratamentos térmicos já são amplamente comercializados e produzem a menor quantidade de compostos tóxicos, dependendo apenas da fonte de energia utilizada.

PALAVRAS-CHAVE: Pannel fotovoltaico, Delaminação, Análise SWOT, Reciclagem

INTRODUÇÃO

O petróleo, atualmente considerado a principal fonte de energia do mundo, tem sido criticado pelos danos que causa ao meio ambiente. Os principais problemas são caracterizados pelo aquecimento global, a liberação de gases poluentes na atmosfera e a contaminação de corpos d'água e do solo (FARRELL *et al*, 2019; LAMEIRINHAS, TORRES e CUNHA, 2022; PASTUSZAK e WĘGIEREK, 2022).

No que diz respeito à sustentabilidade, os combustíveis fósseis são vistos como os grandes vilões da atualidade, pois a geração de gases pode variar entre 400 e 1.000 g.kWh⁻¹ de emissões de CO₂ em usinas termelétricas, sem uma forma eficaz de mitigá-los (GOLDEMBERG *et al*, 2024). Isso ocorre porque as conversões energéticas entre combustível e efluente são desproporcionais aos padrões ambientais atuais. Além disso, os combustíveis fósseis são considerados uma fonte de energia limitada. Dessa forma, a busca por novas fontes de energia livres de carbono é um desafio necessário (CHOWDHURY *et al*, 2020; DIVYA

et al, 2023; FARRELL *et al*, 2019; LAMEIRINHAS, TORRES e CUNHA, 2022; PASTUSZAK e WEĞIEREK, 2022).

Por outro lado, a energia fotovoltaica é considerada uma das fontes de energia viáveis. É uma fonte emergente de energia no mundo, gerando uma quantidade considerável de energia de maneira mais acessível ao público e sem emissões de gases de efeito estufa (GEE). Desde 1999, esse tipo de energia vem crescendo substancialmente devido a programas da Alemanha, Espanha e Japão que integraram módulos fotovoltaicos em edifícios e áreas urbanas (XU *et al*, 2018). Embora esses módulos causem algum tipo de impacto ambiental durante a fase inicial de fabricação, eles permitem que instalações residenciais produzam energia autossuficiente sem gerar poluentes durante a produção de eletricidade (GOLDEMBERG *et al*, 2024; LAMEIRINHAS, TORRES e CUNHA, 2022).

Mesmo promovendo a geração de energia de forma mais sustentável, os painéis fotovoltaicos apresentam um grande desafio logístico quanto ao seu descarte adequado após o fim de sua vida útil (CHOWDHURY *et al*, 2020; FARRELL *et al*, 2019). Um painel fotovoltaico é composto principalmente por células fotovoltaicas, que possuem, em média, uma vida útil estimada de 25 a 30 anos. Mesmo com os avanços tecnológicos e as vantagens da energia fotovoltaica, já é possível sentir os efeitos do descarte em massa desses materiais devido à falta de ações adequadas para a destinação correta desse tipo de resíduo (CHOWDHURY *et al*, 2020; FARRELL *et al*, 2019; XU *et al*, 2018).

Um painel fotovoltaico contém materiais tóxicos como cádmio, índio, gálio e silício, o que pode agravar ainda mais a situação caso seja descartado de forma inadequada. A busca por painéis produzidos por empresas e organizações não governamentais (ONGs) que desenvolvam módulos com maior vida útil e biodegradabilidade tem sido um desafio. No entanto, ainda é necessário um descarte adequado e o tratamento correto dos componentes que compõem o painel solar (CHOWDHURY *et al*, 2020).

A energia fotovoltaica tem ganhado popularidade no Brasil devido às suas vantagens ambientais e econômicas, incluindo a ausência de emissões de gases poluentes e a possibilidade de gerar receita com a venda do excedente de energia para concessionárias, conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 921/2021. Com a Portaria nº 50 de 2022, o mercado se expandiu, permitindo que consumidores do grupo A escolham fornecedores alternativos para até 500 kW, aumentando a competitividade e o acesso a soluções energéticas customizadas.

OBJETIVOS

Esse trabalho está voltado para uma análise SWOT das possíveis rotas de reciclagem dos painéis fotovoltaicos, após o término de vida útil. Além disso, definir quais seriam os meios de reciclagem que possuem mais fatores facilitadores e dificultadores, focando principalmente na realidade brasileira.

METODOLOGIA UTILIZADA

A análise SWOT é uma ferramenta que permite examinar e identificar as vantagens e desvantagens de um determinado processo com base em quatro padrões principais. Esses padrões são definidos como Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats), cuja matriz pode ser visualizada na Tabela 1. Esses fatores são avaliados com base em aspectos internos ou externos e em sua natureza positiva ou negativa (SARSBY, 2016).

Tabela 1. Matriz SWOT com fatores principais

Fatores	Internos	Externos
Positivos	Forças	Oportunidades
Negativos	Fraquezas	Ameaças

Como muitos dos métodos de reciclagem estudados possuem fatores em comum, foi realizada previamente uma compilação geral desses fatores. Eles foram obtidos por meio de um estudo bibliográfico relacionado ao tema de reciclagem de painéis fotovoltaicos ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE). Após essa compilação, identificou-se a correspondência de cada método com os fatores listados, permitindo uma melhor caracterização deles.

Além disso, foi feito um cruzamento dos fatores para cada tipo de tratamento. Dessa forma, foi possível identificar respostas estratégicas para cada método analisado (ASADPOURIAN, RAHIMIAN e GHOLAMREZAI, 2020; SARSBY, 2016). A combinação dos fatores resulta em quatro cenários estratégicos:

- Crescimento (S-O) – O cenário é favorável, e as forças atuais se destacam, criando um ambiente propício para investimentos.
- Desenvolvimento (W-O) – O objetivo principal é aproveitar as oportunidades existentes e transformar fraquezas em pontos positivos.
- Manutenção (S-T) – A situação permanece relativamente estável, utilizando forças internas para mitigar ameaças externas.
- Sobrevivência (W-T) – O pior cenário possível, exigindo escolhas difíceis que podem demandar mudanças radicais ou o abandono do processo.

Essa combinação de fatores foi realizada somando a quantidade de fatores associados a cada método. Assim, um processo com muitas forças e oportunidades é favorável a um cenário de crescimento (S + O). Esse tipo de matriz é identificado como Matriz TOWS.

Considerando que, no estudo dos métodos possíveis, já haviam sido identificados pontos positivos e negativos nos processos, esses foram utilizados como parâmetros para as forças e fraquezas da matriz. As oportunidades e ameaças, por outro lado, exigiram uma abordagem mais ampla e, conseqüentemente, foram baseadas em bibliografias e legislações relacionadas à sustentabilidade e à análise SWOT em geral (ASADPOURIAN, RAHIMIAN e GHOLAMREZAI, 2020, EBRAHIMZADEH *et al*, 2017). Embora não se refiram diretamente à reciclagem de painéis fotovoltaicos, esses estudos fornecem indicadores válidos ao abordar a análise SWOT de métodos de tratamento e ocorrências na reciclagem de WEEE (ASADPOURIAN, RAHIMIAN e GHOLAMREZAI, 2020; EBRAHIMZADEH *et al*, 2017; SARSBY, 2016.).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Métodos de Reciclagem

Os processos de reciclagem de painéis fotovoltaicos são definidos em duas etapas: a delaminação e a remoção dos metais. A delaminação consiste na remoção do encapsulante Etileno Vinil Acetato (EVA), enquanto a remoção de metais consiste na recuperação de metais presentes na célula fotovoltaica. Como a delaminação é considerada a etapa crítica e a reciclagem de painéis fotovoltaicos no Brasil ainda está em nível inicial, está que foi escolhida para ser estudada no trabalho. (CHOWDHURY *et al*, 2020; FARRELL *et al*, 2019; XU *et al*, 2018).

Para avaliar os métodos de reciclagem, buscou-se abordar todos os métodos existentes bem estabelecidos e de tecnologia relativamente nova. Essa escolha se deve à escassez de informações sobre a reciclagem de painéis fotovoltaicos e ao fato de que muitos métodos ainda estão em desenvolvimento. Assim, os dados foram obtidos principalmente a partir de referências bibliográficas. Além disso, alguns métodos diferiram devido a pequenas variações de temperatura, tempo ou concentração de solução. Esses foram agrupados em um único método, pois tais variações não impactariam significativamente os fatores principais para a análise SWOT. A Tabela 2 representa os métodos físicos, químicos e térmicos, respectivamente.

Tabela 2. Métodos compilados de reciclagem para os módulos fotovoltaicos mais conhecidos

Tratamento	Método	Princípio de Funcionamento	Geração do Pannel	Ref.
Físico	Faca Quente	Separa o vidro da camada de EVA/células com um cortador aquecido	1ª	(GHAHREMANI <i>et al</i> , 2024; KO <i>et al</i> , 2023; PREET e SMITH, 2024)
	Pulso de Alta Tensão	Micro explosões no eletrodo de alumínio e no substrato de silício, que separam as camadas do vidro e do <i>backsheet</i>	1ª	(CHEN <i>et al</i> , 2024; GHAHREMANI <i>et al</i> , 2024; KO <i>et al</i>

				al, 2023; PREET e SMITH, 2024)
	Trituração/Moagem	Trituração em etapas em um dispositivo móvel com moinhos de martelo ou de faca	1ª e 2ª	(GHAHREMANI et al, 2024, KO et al, 2023, MAANI et al, 2020)
	Laser	Os eletrodos de alumínio e prata presentes no EVA absorvem a energia do laser pulsado. Aumenta a temperatura do EVA/célula, enfraquecendo a força adesiva na parte traseira do EVA	1ª	(KO et al, 2023, TAO e YU, 2015)
Térmico	Combustão/Pirólise	Queima do painel em um forno	1ª	(KO et al, 2023; PREET e SMITH, 2024)
	Eletrotérmico	Aquecimento RF de 400 W		(KO et al, 2023; PREET e SMITH, 2024)
	Inchaço Solvotérmico com Decomposição Térmica (SSTD)	O reator solvotérmico é previamente tratado com solvente orgânico. O aquecimento forma vapor a partir do solvente orgânico e o reator promove a decomposição/combustão do EVA	1ª	(GHAHREMANI et al, 2024)
Químico	Solvente Orgânico	Imersão em solução orgânica por um longo período	1ª	(CHOWDHURY et al, 2020, GHAHREMANI et al, 2024, KO et al, 2023)
	Solvente Inorgânico	Imersão em solução inorgânica misturada com etanol por um longo período	1ª e 2ª	(GHAHREMANI et al, 2024)
	Solvente Orgânico com Ultrasom	Dissolução do EVA a 343 K em 3 M de tolueno; entretanto, a célula fotovoltaica apresentou várias trincas. (450 W)	1ª	(CHOWDHURY et al, 2020, TAO e YU, 2015)
	CO ₂ Supercrítico	Imersão em solução orgânica na presença de CO ₂ supercrítico	1ª	(GHAHREMANI et al, 2024)

Análise SWOT

Para realizar a análise SWOT, foi necessário preparar uma lista de aspectos técnicos e ambientais de cada processo para identificar quais seriam mais relevantes em uma economia circular.

As listas de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças foram compiladas nas Tabelas 3, 4 e 5, considerando os possíveis aspectos positivos e negativos, bem como os fatores internos e externos. Assim, cada método focará apenas nesses fatores em sua análise SWOT na Tabela 6.

Foi desenvolvido um sistema simples com siglas para cada fator, facilitando a diferenciação. Nesse sistema, o primeiro caractere representa o meio de tratamento, o segundo representa o fator SWOT e o terceiro corresponde a uma ordem numérica.

Tabela 3. Fatores SWOT compilados dos possíveis métodos Físicos.

Tratamento	Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Físico	FS1 - Tratamento simples dos resíduos gerados	FW1 - Geração considerável de ruído (TAO e YU, 2015)	FO1 - A maioria dos processos trabalha com módulos de 1ª e 2ª geração	FT1 - Baixa comercialização em comparação aos tratamentos Químico e

	(CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)			Térmico (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)
	FS2 - Possível separação em diversos resíduos (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	FW2 - Má qualidade de separação, misturando metais tóxicos com outros componentes (TAO e YU, 2015)	FO2 - Mais economicamente viável (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)	FT2 - Necessidade de tratamento adicional para a separação de componentes com maior pureza (TAO e YU, 2015)
	FS3 - Não há emissão de efluentes tóxicos no meio ambiente (TAO e YU, 2015)	FW3 - Alto desgaste dos equipamentos		FT3 - Alta necessidade de manutenção devido ao desgaste dos equipamentos (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)
	FS4 - Remoção facilitada do EVA (TAO e YU, 2015, AKIMOTO, IIZUKA e SHIBATA, 2018)	FW4 - Equipamento caro		FT4 - Estrutura Legal da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Brasileira Nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010)
		FW5 - A maioria dos métodos está em escala laboratorial		
		FW6 - Produção de poeira tóxica (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)		
		FW7 - Possível quebra da célula fotovoltaica (KO <i>et al</i> , 2023)		
		FW8 - Não funciona se o módulo estiver previamente danificado fisicamente (TAO e YU, 2015)		

Tabela 4. Fatores SWOT compilados dos possíveis Métodos Térmicos.

Tratamento	Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Térmico	TS1 – Eliminação total do EVA (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	TW1 – Alto consumo de energia (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	TO1 – Maior probabilidade de manter a célula e o vidro intactos (CHEN <i>et al</i> , 2024)	TT1 – Vulnerável às oscilações do mercado de energia (AL-AQQAD e MENYHART, 2023)
	TS2 – Possível recuperação da célula fotovoltaica completa (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	TW2 – Emissões de gases de efeito estufa (GEE) (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	TO2 – Não gera efluentes tóxicos (AL-AQQAD e MENYHART, 2023)	TT2 – Resolução CONAMA 382/2006, que estabelece parâmetros para emissões atmosféricas (BRASIL, 2006)
	TS3 – Capacidade de processar um volume considerável de painéis fotovoltaicos na mesma operação	TW3 – Emissão de ácido fluorídrico (HF) se o <i>backsheet</i> não for removido (KO <i>et al</i> , 2023)	TO3 – Como a reciclagem de painéis é cara, a reciclagem em larga escala é vantajosa em comparação com outros métodos (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)	

	TS4 – Recuperação de células fotovoltaicas com alta integridade (XU <i>et al</i> , 2021)	TW4 – Requer controle de temperatura (KO <i>et al</i> , 2023)	TO4 – Oportunidade de crescimento com tecnologias de aquecimento verde (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)	
	TS5 – Alta repetibilidade devido à não degradação do solvente orgânico (XU <i>et al</i> , 2021)			

Tabela 5. Fatores SWOT compilados dos possíveis Métodos Químicos.

Tratamento	Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Químico	QS1 – Remoção quase completa da camada de EVA (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QW1 – O tempo de delaminação depende da área do módulo (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QO1 – Possibilidade de reutilização da solução (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)	QT1 – Nem sempre é possível degradar completamente o EVA, sendo menos eficiente que outros métodos (AL-AQQAD e MENYHÁRT, 2023)
	QS2 – Possibilidade de reutilização do solvente (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QW2 – Tempo de deslaminagem consideravelmente longo (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QO2 – Possível reutilização das células fotovoltaicas (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QT2 – Devido à Resolução CONAMA 430/11, é necessário um tratamento cuidadoso dos efluentes (BRASIL, 2011)
	QS3 – Separação simples do EVA (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QW3 – Manuseio de soluções perigosas à saúde humana (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QO3 – Possibilidade de crescimento com pesquisa e desenvolvimento de solventes menos tóxicos e mais sustentáveis (EBRAHIMZADEH <i>et al</i> , 2017)	QT3 – Equipamento caro (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)
	QS4 – Aceleração considerável do processo em poucas horas (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QW4 – Pode requerer tratamento secundário devido à remoção incompleta do EVA (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)		
	QS5 – Remoção completa da camada de EVA (CHOWDHURY <i>et al</i> , 2020)	QW5 – Se não houver controle de expansão, a célula fotovoltaica pode quebrar (TAO e YU, 2015)		
		QW6 – Presença obrigatória de etanol na solução (YAN, 2020)		
		QW7 – Emissão de óxidos poluentes e gases (LOVATO <i>et al</i> , 2021)		

Ao comparar as tabelas, é possível observar uma grande diferença entre os fatores de cada método, além de possíveis inconsistências entre fatores antagônicos dentro de um mesmo método. Isso ocorre porque esses fatores foram obtidos sem discriminação de referências bibliográficas e compilados de forma a possibilitar a comparação transversal entre todos os métodos. Dessa forma, a quantidade de métodos existentes dentro de um tipo de tratamento afeta o tamanho da tabela, contribuindo com mais ou menos fatores específicos.

Nas Tabelas 3, 4 e 5, foram identificados os indicadores necessários para criar uma matriz SWOT baseada em cada tipo de tratamento. No entanto, algumas especificidades distinguem cada método, mesmo dentro de uma única categoria de tratamento. Assim, na Tabela 6, cada tratamento identificado individualmente corresponderá aos fatores mencionados. Apenas as siglas de cada fator foram utilizadas para evitar que a tabela se tornasse confusa e sobrecarregada.

Tabela 6. Correspondência de cada fator listado com cada um dos métodos estudados.

Tratamento	Método	Forças (S)	Fraquezas (W)	Oportunidades (O)	Ameaças (T)
Físico	Faca Quente	FS1, FS2, FS3, FS4,	FW1, FW3, FW4, FW5, FW7	FO2	FT1, FT3, FT4, FT5
	Pulso de Alta Tensão	FS1, FS2, FS3, FS4,	FW1, FW4, FW5, FW7	FO2	FT1, FT3, FT4, FT5
	Trituração/Moagem	FS1, FS2, FS3	FW1, FW2, FW3, FW4, FW6, FW7	FO1, FO2	FT1, FT2, FT3, FT4, FT5
	Laser	FS1, FS2, FS3	FW4, FW5, FW7	FO2	FT1, FT3, FT4, FT5,
Térmico	Combustão/Pirólise	TS1, TS2, TS3	TW1, TW2, TW3, TW4	TO1, TO2, TO3, TO4,	TT1, TT2
	Electrotérmico	TS1, TS3	TW1, TW4	TO2, TO3, TO4,	TT1, TT2
	Inchaço Solvotérmico com Decomposição Térmica (SSTD)	TS1, TS2, TS3, TS4, TS5	TW1, TW2, TW4	TO1, TO2, TO3, TO4,	TT1, TT2
Químico	Solvente Orgânico	QS1, QS2, QS3	QW1, QW2, QW3, QW4, QW5	QO1, QO2, QO3	QT1, QT2
	Solvente Inorgânico	QS1, QS2, QS3, QS4	QW1, QW2, QW6, QW7	QO1, QO2, QO3	QT1, QT2
	Solvente Orgânico com Ultrasom	QS2, QS3, QS4, QS5	QW1, QW2, QW5	QO1, QO2, QO3	QT1, QT2, QT3
	CO ₂ Supercrítico	QS1, QS2, QS3, QS4	QW1, QW3, QW5	QO1, QO2, QO3	QT1, QT2, QT3

Para a elaboração da Tabela 7, que cruza os fatores e identifica em que nível cada método se encaixa nos cenários analisados, foi realizada a soma da quantidade de cada fator. Assim, quanto maior o valor de cada cenário, mais fatores o método apresenta que o tornam compatível.

Tabela 7. Matriz SWOT com a soma da quantidade de fatores correspondentes a cada cenário, indicando o grau de intensidade.

Tratamento	Método	Crescimento (S+O)	Manutenção (S+T)	Desenvolvimento (W+O)	Sobrevivência (W+T)
Físico	Faca Quente	4S + 1O = 5	4S + 4T = 8	5W + 1O = 6	5W + 4T = 9
	Pulso de Alta Tensão	4S + 1O = 5	4S + 4T = 8	4W + 1O = 5	4W + 4T = 8
	Trituração/Moagem	3S + 2O = 5	3S + 5T = 8	6W + 2O = 8	6W + 5T = 11
	Laser	3S + 1O = 4	3S + 4T = 7	3W + 1O = 4	3W + 4T = 7
Térmico	Combustão/Pirólise	3S + 4O = 7	3S + 2T = 7	4W + 4O = 8	4W + 2T = 6
	ElectroTérmico	2S + 3O = 6	2S + 2T = 4	2W + 3O = 5	2W + 2T = 4
	Inchaço Solvotérmico com Decomposição Térmica (SSTD)	5S + 4O = 9	5S + 2T = 7	3W + 4O = 7	3W + 2T = 5
Químico	Solvente Orgânico	3S + 3O = 6	3S + 2T = 5	5W + 3O = 8	5W + 2T = 7
	Solvente Inorgânico	5S + 3O = 8	5S + 2T = 7	4W + 3O = 7	4W + 2T = 6

	Solvente Orgânico com Ultrasom	$4S + 3O = 7$	$4S + 3T = 7$	$3W + 3O = 6$	$3W + 2T = 5$
	CO ₂ Supercrítico	$4S + 3O = 7$	$4S + 3T = 7$	$3W + 3O = 6$	$3W + 3T = 6$

Discussão

Ao analisar as Tabelas 6 e 7, foi possível observar que:

Crescimento:

Por diferentes razões, os três tipos de tratamentos apresentam valores médios com a seguinte ordem de preferência: tratamentos térmicos (7.33), químicos (7.00) e físicos (4.75).

- Os tratamentos químicos e físicos possuem mais forças do que oportunidades, indicando que, apesar de terem muitas vantagens, não são tão robustos quanto os tratamentos térmicos e/ou não possuem tantas oportunidades de crescimento no cenário brasileiro atual.
- Os tratamentos térmicos, portanto, possuem oportunidades iguais ou maiores do que suas forças, o que indica que, em média, têm maior possibilidade de crescimento devido às suas vantagens e ao ambiente favorável.
- Os métodos que apresentam maior afinidade com o cenário de crescimento foram: Solvente Inorgânico e SSTD.

Manutenção:

Neste cenário, as médias foram observadas para os tratamentos químicos com valor de (6.50) e físicos (7.75), enquanto o tratamento térmico (6.00) apresentou valores mais baixos.

- Isso se justifica porque, apesar de possuírem forças bem estabelecidas, os tratamentos químicos e físicos enfrentam dificuldades mais significativas devido a fatores ambientais e de mercado externos, como equipamentos caros e geração de resíduos tóxicos.
- Por outro lado, os tratamentos térmicos enfrentam menos barreiras, pois utilizam, em sua maioria, equipamentos simples e, embora emitam gases de efeito estufa durante a operação, não apresentam tantas ameaças ambientais. Assim, o tratamento térmico é o que menos se encaixa no cenário de manutenção.
- Os métodos que mais necessitam de manutenção para eliminar ameaças são: Faca Quente, Pulso de Alta Voltagem e Trituração/Moagem.

Desenvolvimento:

Os três tipos de tratamento apresentam médias aritméticas semelhantes, na seguinte ordem do melhor para o pior: tratamento químico (6.75), térmico (6.67) e físico (5.75).

- Apesar da semelhança conceitual entre os cenários de desenvolvimento e crescimento, há um fator crucial que diferencia o desenvolvimento: a oportunidade de eliminar fraquezas.
- Muitos tratamentos físicos ainda estão em fase laboratorial e podem ser aprimorados para superar suas deficiências. Já os tratamentos químicos, apesar de não terem tantas fraquezas, estão bem estabelecidos e possuem menos oportunidades de desenvolvimento.
- O tratamento térmico, junto com o químico se destaca nesse setor, pois ainda apresenta boas oportunidades de crescimento e desenvolvimento, além de possuir menos fraquezas em comparação aos físicos.
- Os métodos com maior potencial de desenvolvimento são: Trituração/Moagem, Solvente Orgânico e Combustão/Pirólise.

Sobrevivência:

Neste cenário, os tratamentos químicos (6.00) e físicos (8.75) possuem os valores médios mais altos. Como o cenário de sobrevivência é negativo, quanto menos uma técnica se identificar com ele, menos críticas serão suas condições.

- O tratamento que apresentou a menor pontuação média neste cenário foi o térmico (5.00), o que significa que ele tem a maior chance de sobrevivência no Brasil, pois apresenta menos fraquezas e ameaças.
- Isso demonstra que os métodos físicos e químicos podem não ser viáveis dependendo da situação e da localização.

- Os métodos que precisam ser reavaliados para aplicação são: Faca Quente, Trituração/Moagem e Pulso de Alta Voltagem.

Com base na avaliação dos quatro cenários, pode-se concluir que, de maneira geral, os tratamentos físicos e químicos, independentemente do método, enfrentariam maiores dificuldades para se estabelecer no Brasil. No entanto, isso não significa que devam ser descartados, pois apresentam potencial de desenvolvimento para superar suas fraquezas e ameaças e se tornarem métodos mais viáveis.

O tratamento térmico, portanto, se destaca como a opção mais promissora para a escolha de qualquer método de delaminação de módulos fotovoltaicos, permanecendo preferencialmente em primeiro lugar e apresentando resultados positivos em todos os cenários analisados. A maioria dos métodos térmicos já é comercializada, produz poucos elementos tóxicos e exige basicamente apenas equipamentos e energia (raramente necessitando de insumos), o que é um fator significativo para sua força no Brasil.

Dessa forma, com base na avaliação das Tabelas 6 e 7, concluiu-se que os métodos que melhor caracterizam o sistema brasileiro são o SSTD e o Eletrotérmico, pois apresentam valores similares na maioria dos cenários analisados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi possível identificar que alguns métodos de reciclagem de painéis fotovoltaicos apresentam certas vantagens. No entanto, como observado, cada método depende fortemente das condições operacionais locais.

Embora não seja uma ferramenta absoluta, a análise SWOT proporcionou uma boa compreensão das metodologias de reciclagem desse tipo de resíduo dentro da realidade brasileira atual. A indicação de suas vantagens e desvantagens, bem como suas oportunidades e ameaças, pode estimular soluções para os principais problemas desses métodos.

Considerando a realidade brasileira, na qual ainda não é possível reciclar painéis solares em larga escala, o tratamento térmico seria o mais adequado, com os métodos SSTD e Eletrotérmico se destacando como os mais promissores. Isso ocorre porque eles apresentaram os melhores resultados gerais entre os métodos discutidos na análise SWOT. Portanto, esses tratamentos térmicos podem ser considerados métodos de alta recuperação para reutilização de componentes, dependendo apenas de uma matriz energética já estabelecida, gerando menos problemas operacionais.

Por meio da análise SWOT, concluiu-se que, para a adoção de cada método, existem predefinições que devem ser respeitadas. Embora os métodos SSTD e Eletrotérmico sejam considerados os mais apropriados em um contexto geral brasileiro, a escolha do método depende de fatores como localização, orçamento, quantidade de módulos a serem reciclados, qualidade da operação, entre outros. Cada método possui vantagens específicas, e nenhum deles é absolutamente superior.

Devido às leis e regulamentações estabelecidas no Brasil e ao impacto ambiental do descarte inadequado de resíduos eletrônicos (WEEE), a necessidade de definir uma rota padrão para a reciclagem de módulos fotovoltaicos é uma conclusão evidente. Considerando a vida útil de um painel fotovoltaico, um grande fluxo de painéis para descarte já ocorreu este ano na Europa. Como o Brasil começou a vivenciar seu crescimento na energia fotovoltaica por volta de 2013, espera-se que, dentro de 14 anos, haja uma quantidade expressiva de resíduos necessitando de um descarte adequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIMOTO, Y.; IIZUKA, A.; SHIBATA, E. High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels. *Minerals Engineering*, v. 125, p. 1–9, 2018. doi:10.1016/j.mineng.2018.05.015.
- AL-AQQAD, A. O. G.; MENYHART, J. Solar panels problem after end-of-life and waste management (SWOT analysis for the global directives of PV's waste management). *International Review of Applied Sciences and Engineering*, v. 14, n. 2, p. 220–229, 2023. doi:10.1556/1848.2022.00511.

- ASADPOURIAN, Z.; RAHIMIAN, M.; GHOLAMREZAI, S. *SWOT-AHP-TOWS Analysis for Sustainable Ecotourism Development in the Best Area in Lorestan Province, Iran*. Social Indicators Research, v. 152, p. 289–315, 2020. doi:10.1007/s11205-020-02438-0.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006*. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, n. 1, p. 131–137, 2 jan. 2007.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 3, 3 ago. 2010.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, n. 92, p. 89–96, 16 mai. 2011.
- CHEN, P.-H.; CHEN, W.-S.; LEE, C.-H.; WU, J.-Y. *Comprehensive Review of Crystalline Silicon Solar Panel Recycling: From Historical Context to Advanced Techniques*. Sustainability, v. 16, n. 1, art. 60, 2024. doi:10.3390/su16010060.
- CHOWDHURY, Md. S.; RAHMAN, K. S.; CHOWDHURY, T.; NUTHAMMACHOT, N.; TECHATO, K.; AKHTARUZZAMAN, Md.; TIONG, S. K.; SOPIAN, K.; AMIN, N. *An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling*. Energy Strategy Reviews, v. 27, art. 100431, 2020. doi:10.1016/j.esr.2019.100431
- DIVYA, A.; ADISH, T.; KAUSTUBH, P.; ZADE, P. S. Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 253, art. 112151, 2023. doi:10.1016/j.solmat.2022.112151.
- EBRAHIMZADEH, G.; BIGLARI, H.; ABOUEE MEHRIZI, E.; ZAREI, A.; NAROOIE, M. R.; BANESHI, M. M. Determining appropriate strategy to improve performance of solid waste recycling system in Zahedan by SWOT method. *Pollution Research*, v. 36, n. 3, p. 437–444, 2017
- FARRELL L, C.; OSMAN, A. I.; ZHANG, X.; MURPHY, A.; DOHERTY, R.; MORGAN, K.; ROONEY, D. W.; HARRISON, J.; COULTER, R. *Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules*. Scientific Reports, v. 9, art. 5267, 2019. doi:10.1038/s41598-019-41762-5.
- GHAHREMANI, A.; ADAMS, S. D.; NORTON, M.; KHOO, S. Y.; KOUZANI, A. Z. Delamination Techniques of Waste Solar Panels: A Review. *Clean Technologies*, v. 6, n. 1, p. 280–298, 2024. doi:10.3390/cleantechnol6010014.
- GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C.; COELHO, S. T.; ZILES, R.; BENEDITO, R.; LÚCIO, G.; MAMBELLI, R.; GALHARDO, C.; PINHO, J. T.; PEREIRA, E.; SILVA, E. P. da. *Energias Renováveis*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2012. ISBN 978-85-212-0608-8
- KO, J.; KIM, K.; SOHN, J. W.; JANG, H.; LEE, H.-S.; KIM, D.; KANG, Y. *Review on Separation Processes of End-of-Life Silicon Photovoltaic Modules*. Energies, v. 16, n. 11, art. 4327, 2023. doi:10.3390/en16114327.
- LAMEIRINHAS, R. A. M.; TORRES, J. P. N.; CUNHA, J. P. M. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. *Energies*, v. 15, n. 5, p. 1823, 2022. doi:10.3390/en15051823.
- LOVATO, É. S.; DONATO, L. M.; LOPES, P. P.; TANABE, E. H.; BERTUOL, D. A. *Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials*. Journal of CO₂ Utilization, v. 46, art. 101477, 2021. doi:10.1016/j.jcou.2021.101477.
- MAANI, T.; CELIK, I.; HEBEN, M. J.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. *Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CdTe) solar panels*. Science of the Total Environment, v. 735, art. 138827, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138827.
- PASTUSZAK, J.; WĘGIEREK, P. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *Materials*, v. 15, n. 16, art. 5542, 2022. doi:10.3390/ma15165542.
- PREET, S.; SMITH, S. T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, v. 448, art. 141661, 2024. doi:10.1016/j.jclepro.2024.141661.
- SARSBY, A. *SWOT Analysis: A Guide to SWOT for Business Studies Students*. 1. ed. Stowmarket: Spectaris Ltd., 2016. ISBN 978-0-9932504-2-2
- TAO, J.; YU, S. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 141, p. 108–124, 2015. doi:10.1016/j.solmat.2015.05.005.
- XU, X.; LAI, D.; WANG, G.; WANG, Y. Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. *Chemical Engineering Journal*, v. 418, p. 129457, 2021. doi:10.1016/j.cej.2021.129457.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: a review. *Waste Management*, v. 75, p. 450–458, maio 2018. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.036.

YAN, Y.; WANG, Z.; WANG, D.; CAO, J.; MA, W.; WEI, K.; YUN, L. Recovery of silicon via using KOH-ethanol solution by separating different layers of end-of-life PV modules. *JOM*, v. 72, n. 7, p. 2624–2632, maio 2020. doi:10.1007/s11837-020-04193-6.