E-Cycle

ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE EEE

PLANO DE I&D - DOCUMENTO DE APOIO

Propostas de reciclagem e recuperação de componentes valiosos do desmantelamento de painéis fotovoltaicos

Setembro de 2021

Índice:

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS 1
1. INTRODUÇÃO 2
1.1. Breve enquadramento 2
1.2. Objetivos 2
2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS 3
2.1. Tipologia de painéis fotovoltaicos 3
2.2. Estrutura dos painéis de silício cristalino (c-Si) 5
3. PROPOSTAS DE PROCESSOS DE RECICLAGEM 7
3.1. Proposta nº 1 8
3.2. Proposta nº 2 9
3.3. Proposta nº 3 10
3.4. Proposta nº 4 11
3.5. Proposta nº 5 13
3.6. Proposta adicional – mesa de desmantelamento 14
4. VALORIZAÇÃO DOS MATERIAIS RECUPERADOS 15
5. CONCLUSÃO 16
REFERÊNCIAS 18

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Ag – prata;

Al – alumínio;

a-Si –silício amorfo;

CdTe – telureto de cádmio;

CIGS – (di)seleneto de cobre-índio-gálio;

CPV – concentrador fotovoltaico;

c-Si – silício cristalino;

Cu – cobre;

DSSC – célula solar sensibilizada/ativada por corante

EVA – acetato-vinilo de etileno;

Ga – gálio;

GaAs – arsenieto de gálio;

Gwh – gigawatt-hora;

In – Índio;

LCA – avaliação do ciclo de vida;

OPV – células solares orgânicas;

PE – polietileno;

PET – poli(tereftalato de etileno)

PVB – polivinil butiral;

PVF –poli(fluoreto de vinilo);

PVP – *photovoltaic panel* (painel fotovoltaico);

S – enxofre;

Si – silício;

Se – selénio;

TiO_2 – dióxido de titânio;

TWh – terawatt-hora;

µc-Si – silício microcristalino;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Breve enquadramento

Os painéis fotovoltaicos (PVPs) são tecnologias produzidas mundialmente, assumidas como uma das alternativas para geração de energia elétrica face aos combustíveis fósseis, sendo expectável um crescimento da sua produção nos próximos anos, dada a oportunidade oferecida de mitigação de emissões de gases de efeito de estufa.

Em Portugal, começam agora a aparecer os primeiros painéis em fim de vida. Estas tecnologias englobam na sua constituição várias matérias-primas, sendo algumas delas valiosas (caso da prata e silício). A crescente consciencialização e sensibilização pelo meio ambiente levou à preocupação em assegurar e garantir um tratamento adequado dos produtos no seu momento de fim de vida, de forma que estes possam ser valorizados e reintroduzidos novamente na cadeia de valor, mesmo que noutras fileiras industriais.

No caso dos painéis fotovoltaicos, existem já alguns processos de reciclagem aplicados. Neste contexto, os processos de valorização foram estudados e testados em escala laboratorial, de forma a permitir identificar a alternativa de reciclagem mais viável e mais adequada.

1.2. Objetivos

O presente Documento de Apoio, desenvolvido pelo CATIM (Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica), visa:

- Resumir o trabalho laboratorial desenvolvido no âmbito do estudo "Acompanhamento do processo de desmantelamento de painéis fotovoltaicos e estudo da reciclagem dos resíduos provenientes dos mesmos", salientando as principais ideias e conclusões obtidas;
- Apoiar e servir como guia prático para todos os fabricantes e intervenientes da cadeia de valor associada à produção de Painéis Fotovoltaicos, para auxiliar na tomada de decisão.

2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.1. Tipologia de painéis fotovoltaicos

Os Painéis Fotovoltaicos (PVP) são distinguidos de acordo com o tipo de célula solar incorporada na sua constituição, sendo por isso classificados em três gerações.

A 1ª Geração (c-Si)	
Constituída por células de silício cristalino (c-Si) ou de folhas/fitas condutoras [3], [4].	
Monocristalino	**Policristalino**
• Estrutura homogénea (átomos orientados numa única direção); • Elevado grau de pureza face às células policristalinas; • Custos de produção superiores face às células policristalinas; • Eficiência: 13-19%.	• Estrutura heterogénea; • Grau de pureza inferior ao das células monocristalinas; • Custos de produção inferiores, face às células monocristalinas; • Eficiência: 11-18%.

A 2ª Geração (c-Si)		
Construídas através da deposição de filmes finos de um material fotossensível em substratos de baixo valor (vidro, plástico, aço inoxidável), podendo ter uma ou mais camadas. Quando o substrato utilizado é plástico, o módulo é flexível possibilitando outras aplicações [4], [7].		
Silício amorfo (a-Si)	**Telureto de cádmio (CdTe)**	**CIGS**
Apesar da sua maior capacidade de absorção de luz solar comparativamente com as células de c-Si, o baixo fluxo de eletrões diminui a sua eficiência, pelo que a sua produção foi descontinuada.	Células de telureto de cádmio (CdTe) possuem uma melhor eficiência que as células de a-Si, porém apresentam limitações devido à toxicidade de cádmio e à escassez de telúrio.	As células de (di)seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), o seu comportamento semicondutor deve-se ao índio, gálio e selénio metálico [3], [7], [8].
Eficiência: 4 - 8%	Eficiência: 10 - 11%	Eficiência: 7 - 12%

A 3ª Geração (c-Si)			
Construídas através da deposição de filmes finos de um material fotossensível em substratos de baixo valor (vidro, plástico, aço inoxidável), podendo ter uma ou mais camadas. Quando o substrato utilizado é plástico, o módulo é flexível possibilitando outras aplicações [4], [7].			
CPV	**DSSC**	**OPV**	**Híbridas**
Os concentradores fotovoltaicos (CPV), usam lentes e espelhos curvos para concentrar a luz solar nas células solares, sendo usadas em conjunto com rastreadores que orientam o CPV de forma a captar o máximo de luz possível.	Células de telureto de cádmio (CdTe) possuem melhor eficiência do que as células de a-Si, porém apresentam limitações devido à toxicidade de cádmio e à escassez de telúrio.	As células solares orgânicas (OPV) são compostas por materiais biodegradáveis, que têm um custo reduzido atendendo ao tipo de material utilizado (polímeros orgânicos ou pequenas moléculas orgânicas). Porém degradam-se facilmente [2]–[5].	As células híbridas envolvem a combinação de diferentes materiais, orgânicos e inorgânicos ou de silício cristalino com silício amorfo. Por vezes estas células são designadas como filme de multicamada de silício (a-Si/µc-Si) [3], [4], [7].
Eficiência: ≈ 25%	Eficiência: 10 - 11%	Eficiência: 4 - 6%	Eficiência: 7 - 9%

2.2. Estrutura dos painéis de silício cristalino (c-Si)

A estrutura mais comum dos PVPs de c-Si (PVPs de 1ª geração) é a representada na Figura 1.

As camadas são mantidas unidas através do efeito sanduiche, conseguido pela utilização de um caixilho em alumínio, extrudido e anodizado [3], [12]. É utilizado um vidro temperado (por vezes pode ser texturado), com uma espessura de 2 – 5 mm, com o intuito de conferir resistência mecânica e proteção aos módulos e garantir as propriedades óticas [3], [7], [13], [14].

Surge depois o encapsulamento, designação dada ao conjunto que compreende o subconjunto do módulo (duas camadas poliméricas e a célula solar) e a camada de suporte. As duas camadas poliméricas, transparentes, servem de adesivo entre os módulos e o vidro, incorporam o semicondutor, sendo geralmente constituídas pelo copolímero de acetato-vinilo de etileno (EVA), com espessura entre 300 – 500 µm ou de polivinil butiral (PVB) [3], [5], [7], [14].

A camada de suporte também é polimérica (espessura entre 200 – 500 µm), podendo ser de polietileno (PE), poli(tereftalato de etileno) (PET) ou ainda por poli(fluoreto de vinilo) (PVF). Contudo, a solução mais usual é a utilização de Tedlar®, que combina a utilização de filmes de PVF – PET – filme PVF (*Tedlar®* TPT) ou filme de PVF – PET (*Tedlar®* TPE). A utilização desta camada protege o módulo fotovoltaico da humidade e confere resistência mecânica ao conjunto [3], [14]. A célula solar é a estrutura central de um modo fotovoltaico.

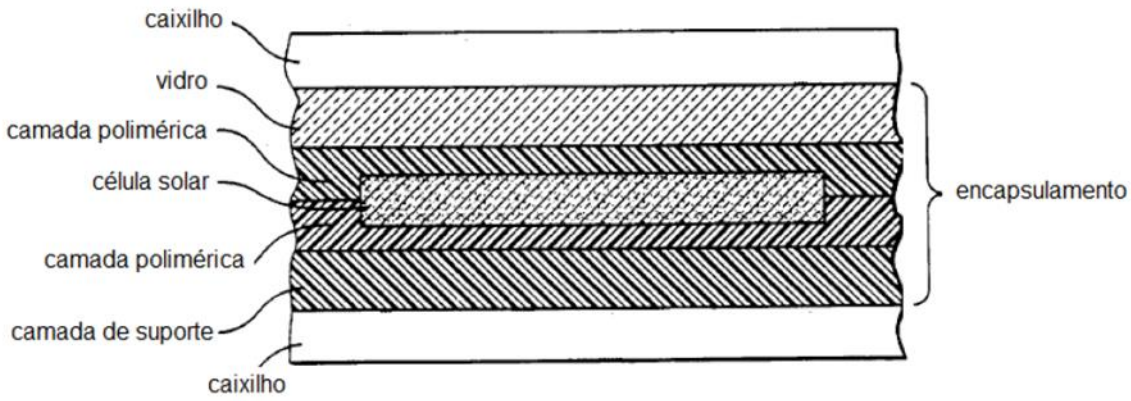

Figura 1 - Corte transversal de um módulo fotovoltaico, adaptado de [12].

Cada *wafer* é composta, dos dois lados, por uma rede de contatos elétricos colada à superfície. Esta rede de contatos pode ser de uma liga ou pasta condutora (pasta de prata) ou de fio metálico de titânio, crómio, alumínio, prata, etc.

É frequente a utilização de diferentes materiais nas distintas redes de contato em cada célula (ex: fios de prata na parte frontal e elétrodos de alumínio na parte de trás). No caso da utilização de fios de prata, alguns autores indicam uma largura de aproximadamente 100 µm [5], [12], [15], [16].

A ligação entre as diferentes células solares que constituem o módulo e as caixas de junção é feita por fios de cobre revestidos com chumbo, enquanto a ligação entre as células solares (fios condutores) é feita por fios de cobre banhado com chumbo ou estanho [5], [12], [15].

Na **Figura 2** - A é apresentada a vista de cima de uma célula solar, vulgarmente designada por *wafer*, enquanto na **Figura 2** - B é apresentado um módulo fotovoltaico. Na **Figura 2**- B são visíveis as caixas de junção as quais são, normalmente, produzidas por injeção de um polímero. A sua função é fornecer meios para transportar a eletricidade gerada pelos módulos para outros componentes, como reguladores de carga, baterias e inversores. Estão conectadas à superfície externa da camada de suporte (colada com silicone), sendo, por isso, a interface entre o utilizador e o interior do módulo. A ligação entre os contatos da caixa e do módulo é feita recorrendo ao processo de soldadura [12], [17].

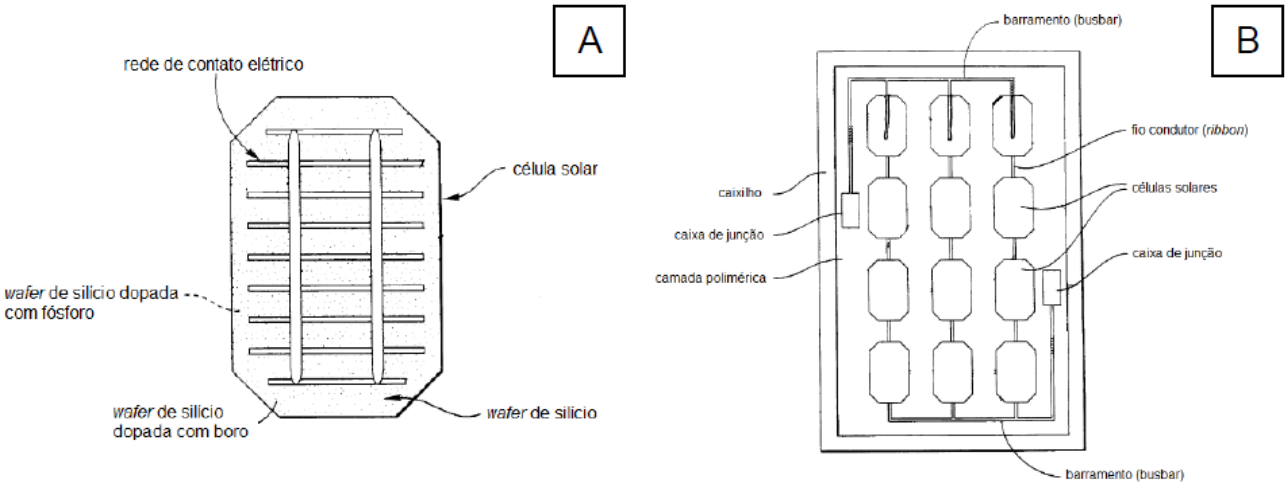

Figura 2 – A: *vista de cima de uma célula solar;* ***Figura 2 – B****: exemplo de um módulo fotovoltaico, (adaptadas de [12]).*

3. PROPOSTAS DE PROCESSOS DE RECICLAGEM

Os processos de reciclagem estudados foram testados a nível laboratorial. Existiu a preocupação de considerar os processos menos impactantes, no que respeita a impacte ambiental, abundância/escassez de recursos, gastos energéticos e efluentes/emissões gerados, e custos associados. Deste modo, as propostas apresentadas neste capítulo são predominantemente mecânicas e procuraram essencialmente:

- Mitigar e reduzir os impactes ambientais;
- Recuperar material para posterior valorização, adotando conceitos de *upcycling* (silício, cobre e prata) e *downcycling* (vidro e alumínio).

Adicionalmente, existe a preocupação em recuperar o caixilho de alumínio antes da trituração e após trituração, para que seja possível recuperar o máximo de alumínio e prata presentes.

Relativamente ao polímero EVA, pretende-se a sua valorização, através da reciclagem e/ou reutilização, desde que esta não seja submetida a processos térmicos que provoquem a sua decomposição.

3.1. Proposta nº 1

A proposta nº 1, apresentada na **Figura 3**, consiste na adoção de um conjunto de processos mecânicos que se traduzem na recuperação de todos os materiais, à exceção do alumínio do caixilho e dos cabos elétricos, que são recuperados manualmente.

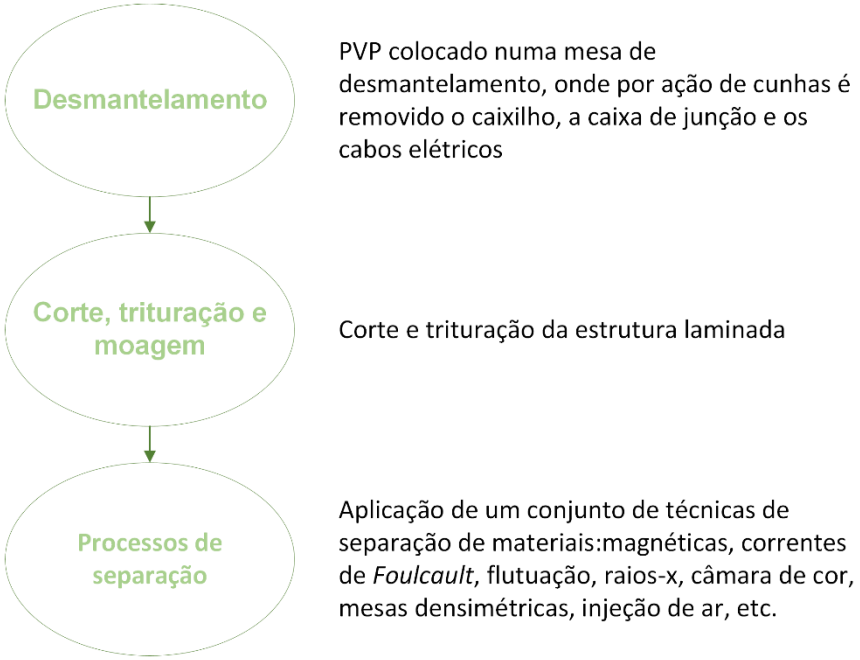

Figura 3 - Etapas do método de reciclagem para a proposta nº1

Curiosidade: A realização de uma etapa de descarnamento dos fios, em paralelo com o processo principal, pode acrescentar valor aos materiais recuperados após o desmantelamento.

O **Quadro 1** apresenta um resumo dos principais aspetos a ter em consideração face a esta proposta.

Quadro 1 - Desafios, vantagens e desvantagens da proposta nº1

Desafios	Vantagens	Desvantagens
- Adaptar equipamentos para as três etapas; - Otimizar as técnicas de separação para os materiais em questão; - Reciclar um PVP entre 60 a 90s, com elevada taxa de recuperação.	- Proposta com menor número de etapas e de curta duração; - Processo de sucesso comprovado (otimizadas todas as etapas); - Separação (total) de diferentes materiais.	- Eventual necessidade de adaptar equipamentos; - Poluição sonora da etapa de trituração e moagem.

3.2. Proposta nº 2

O processo apresentado na **Figura 4** resulta da adição de duas etapas ao processo da proposta nº1.

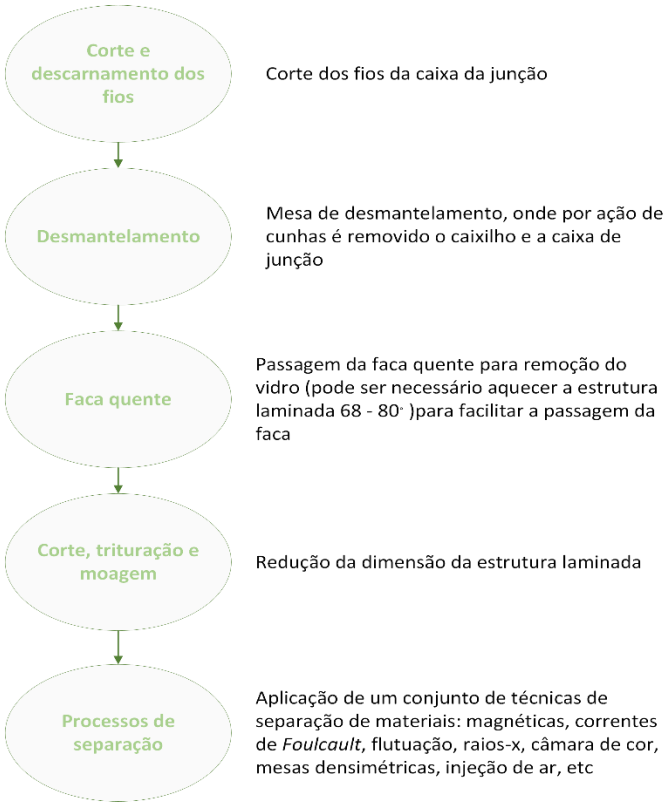

Figura 4 - Etapas do método de reciclagem para a proposta nº2

A realização de uma etapa de "corte e descarnamento dos fios" permite recolher os fios e com o descarnamento recuperar imediatamente o fio condutor. Após o "desmantelamento", a aplicação de uma etapa suplementar com a utilização de uma faca quente, possibilita a recuperação do vidro, intacto, e reduz a quantidade de material a ser triturado.

Atenção: É necessário avaliar o comportamento do vidro temperado durante a passagem da faca quente (se possui resíduos de EVA e de outros materiais, por exemplo).

No **Quadro 2** encontram-se descritos, resumidamente, alguns aspetos a ter em consideração nesta proposta.

Quadro 2 - Desafios, vantagens e desvantagens da proposta nº2

Desafios	Vantagens	Desvantagens
- Definir a temperatura ideal da faca; - Recuperar o vidro intacto; - Definir se há deslocamento da faca ou da estrutura laminada; - Através de sensores (óticos), passar a faca o mais próximo possível do vidro.	- Recuperação do vidro intacto; - Menor quantidade de material a ser triturado; - Recuperação do silício da *wafer*.	- Introdução de uma nova etapa (processo mais demorado); - Necessidade de proceder ao aquecimento da faca; - Necessidade de utilizar ventosas para segurar o vidro após passagem da faca quente; - Desconhecimento do comportamento do vidro temperado com a passagem da faca.

3.3. Proposta nº 3

O método agora proposto, esquematizado na **Figura 5**, consiste numa etapa de moagem seguida de um tratamento térmico simples, em estufa.

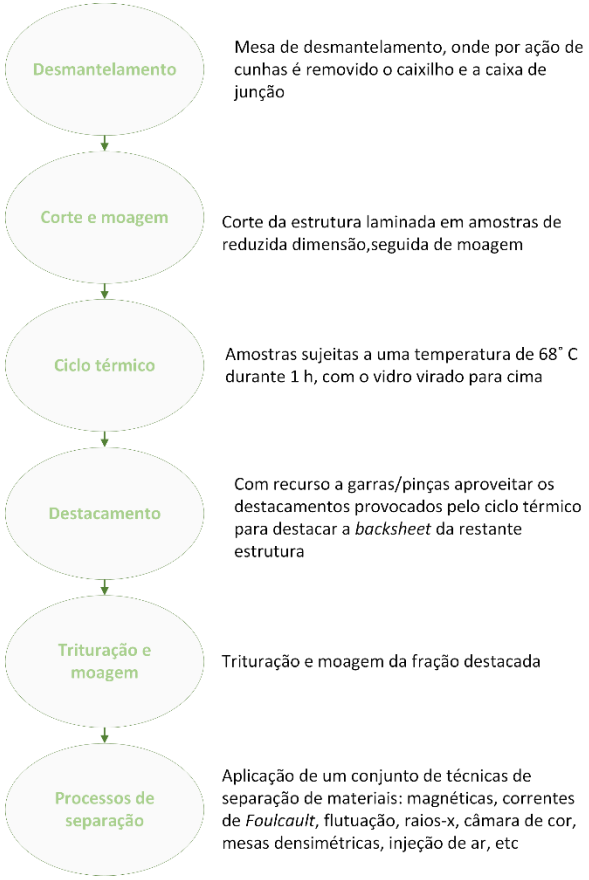

Figura 5 - Etapas do método de reciclagem para a proposta nº3

No **Quadro 3** encontram-se descritos, resumidamente, alguns aspetos a ter em consideração face a esta proposta.

Quadro 3 - Desafios, vantagens e desvantagens da proposta nº3

Desafios	Vantagens	Desvantagens
- Otimizar as condições do ciclo térmico (68˚C, 60min) à escala industrial; - Tentar realizar o destacamento imediatamente após o ciclo térmico (evitando o choque térmico); - Separar e recuperar os materiais.	- O destacamento da *backsheet* permite logo a sua recuperação; - A combinação do ciclo térmico com o destacamento pode destacar o *backsheet* e o vidro.	- Combina a utilização de temperatura com um processo mecânico; - Nos resultados laboratoriais não foi possível destacar a *backsheet* sem que tenha acoplado partes da *wafer*.

3.4. Proposta nº 4

Esta proposta apresenta um método idealizado como 100% mecânico, não descartando a inclusão de uma etapa de aquecimento (estufa entre 68 ˚C a 80 ˚C) para beneficiar o processo.

Para facilitar a reciclagem, propõem-se a utilização de mesa/arco de corte por fio quente (Figura 6) após a colocação do PVP na mesa de desmantelamento. De forma a uniformizar o processo, podem ser colocadas de forma sequencial a mesa de desmantelamento e a mesa/arco de corte por fio quente (motorizado para permitir o corte ao longo do PVP), utilizando sensores óticos para fazer o corte com precisão junto ao vidro temperado.

Figura 6 - Exemplar da mesa e arco de corte por fio quente [83].

Na **Figura 7** apresenta-se a sequência de etapas que constituem o método proposto.

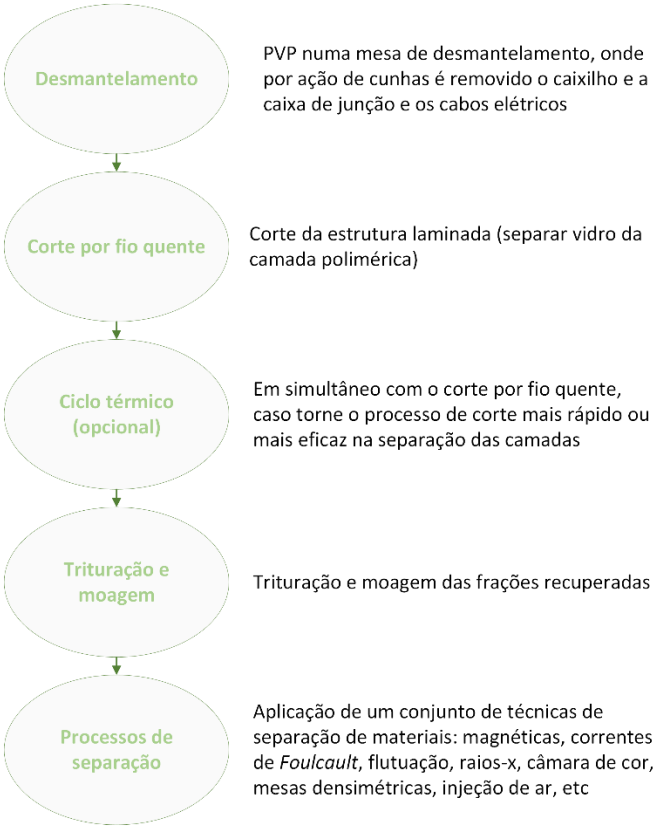

Figura 7 - Etapas do método de reciclagem para a proposta nº4

O **Quadro 4** apresenta os aspetos a ter em consideração na seleção desta proposta.

Quadro 4 - Desafios, vantagens e desvantagens da proposta nº4

Desafios	Vantagens	Desvantagens
- Adaptar a mesa/arco de corte por fio quente; - Utilizar sensores óticos para a passagem do fio; - Reciclar um PVP num curto espaço de tempo e com elevada taxa de recuperação; - Possibilitar a separação, de forma isolada, de alguns materiais da estrutura laminada.	- Eventual separação de materiais de forma isolada; - Moagem apenas da secção EVA/*wafer*/EVA; - Processo contínuo: desmantelamento, corte por fio, trituração e moagem.	- Necessidade de adaptar a mesa de corte; - Utilização de sensores óticos.

3.5. Proposta nº 5

Com a utilização de um jato de água (ou areia), pretende-se recuperar a fração metálica. Contudo, poderá ser necessária a realização de um tratamento aos resíduos resultantes da decapagem. Na **Figura 8** apresenta-se a sequência de etapas que constituem o método proposto.

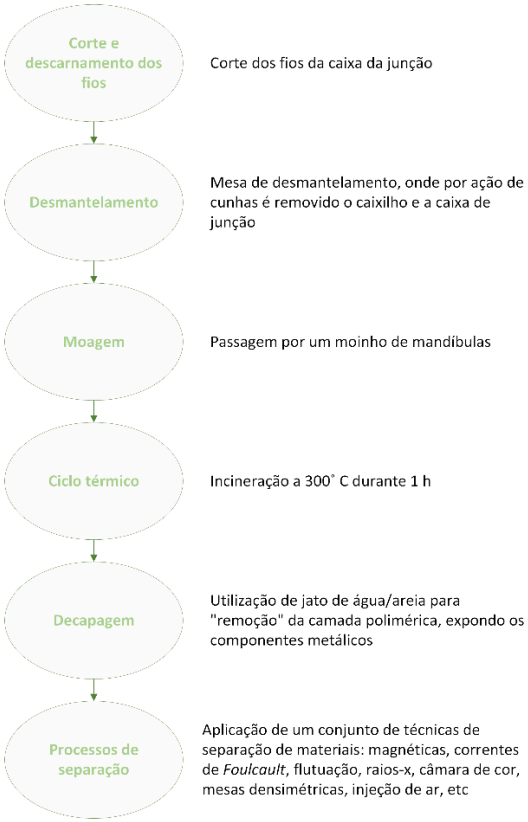

Figura 8 - Etapas do método de reciclagem para a proposta nº5

No **Quadro 5** encontram-se em descritos, resumidamente, alguns aspetos a ter em conta nesta proposta.

Quadro 5 - Desafios, vantagens e desvantagens da proposta nº5

Desafios	Vantagens	Desvantagens
- Otimizar as condições de incineração e de decapagem.	- A decapagem permite a recuperação dos componentes metálicos.	- Custos de operação elevados; - Necessária uma moagem antes do ciclo térmico; - Tratamento a realizar aos subprodutos/resíduos da decapagem.

3.6. Proposta adicional – mesa de desmantelamento

Eventuais dificuldades no processo de desmantelamento mecânico podem advir da presença das cantoneiras e da utilização de silicone na secção de alumínio onde encaixa a estrutura laminada. Assim, no **Quadro 6** é proposto um modelo para um protótipo de mesa de desmantelamento. Este modelo será motorizado, elétrico, hidráulico ou com ar comprimido para fornecer energia para a movimentação das cunhas.

Quadro 6 - Proposta para a mesa de desmantelamento

	Descrição	Objetivo
Posição do painel	Vidro para cima	Permite manusear os PVP com ventosas, tornando todo o processo mais rápido
Caixa de junção e cabos elétricos	Removida nesta etapa	Possibilita a recuperação destes componentes
Cunhas	Em todo o comprimento e topo	-
Nº de cunhas	4	-
Movimentação das cunhas	Sequencial (primeiro em topos)	A aplicação de força nos topos em primeiro lugar facilita a separação do caixilho, apesar da cantoneira
Geometria da cunha	Em "L" invertido	Com o PVP de vidro para cima, esta geometria permite a aplicação de força na zona do cordão de silicone, próximo da secção em que o módulo está inserido no caixilho

Curiosidade: O número de cunhas, a sua geometria e a posição em que são colocadas, pode ainda ser estudada e otimizada de forma a diminuir a quantidade de material necessário para produzir as cunhas bem como a potência que o motor tem de fornecer para garantir o desmantelamento do caixilho. Podem, de forma idealista, ser utilizadas mais cunhas de menor dimensão, dispostas em zonas específicas (quinas) e distribuídas ao longo do comprimento, desde que garantido o desmantelamento.

4. VALORIZAÇÃO DOS MATERIAIS RECUPERADOS

No **Quadro 7** apresentam-se os materiais cuja recuperação é expectável através dos diferentes métodos propostos. A sua valorização é maioritariamente conseguida pela sua reintrodução em processos como matéria-prima reciclada, de custo inferior.

Quadro 7 - Listagem de materiais com potencial de recuperação pelos processos de reciclagem

<table>
<tr><th>Material</th><th>Estado em que é recuperado dependendo do método de reciclagem utilizado</th><th>Observações e exemplos de valorização de material</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Alumínio</td><td>Perfil de alumínio</td><td rowspan="6">A reutilização destes metais, é possível, bastando para tal a realização de um processo de fundição. Destaque para a prata, que apesar da presença pouco significativa num PVP, tem valor comercial estimulante para o processo de reciclagem.</td></tr>
<tr><td>Triturado</td></tr>
<tr><td>Prata</td><td>Triturada</td></tr>
<tr><td>Silício</td><td>Triturado</td></tr>
<tr><td>Cobre</td><td>Triturado</td></tr>
<tr><td>Estanho</td><td>Triturado</td></tr>
<tr><td>Chumbo</td><td>Triturado</td></tr>
<tr><td>Vidro</td><td>Triturado (ou intacto)</td><td>O vidro temperado dificulta o processo de transporte do mesmo, pelo que é sempre preferível a sua recuperação após trituração/moagem, que facilita o transporte e muito provavelmente a sua reutilização como casco, na indústria vidreira, como filler em cimentos, argamassas e betões ou como matéria-prima em aplicações que necessitam de elevado teor de sílica.</td></tr>
<tr><td>EVA</td><td>Triturado</td><td>Indústria do calçado [84].</td></tr>
<tr><td>Tedlar®</td><td>Triturado</td><td>Caso a sua recuperação seja efetuada através da Proposta nº3 ou da Proposta nº4, é necessário encontrar uma solução de reciclagem.</td></tr>
</table>

5. CONCLUSÃO

Os métodos descritos ao longo deste trabalho foram, na sua maioria, apenas testados à escala laboratorial. Contudo, é possível apresentar os prós e os contras da sua aplicação.

- A aplicação de **processos mecânicos** revela-se vantajosa pela sua elevada taxa de reciclagem (90% em massa) e existência de equipamento disponível no mercado. Os inconvenientes da utilização destes métodos são a elevada poluição (sonora e de emissão de partículas) e a reduzida pureza do silício obtido, tornando difícil a sua reutilização.
- As vantagens de utilização de **processos térmicos** são a recuperação das *wafers* de silício e o vidro intacto. No entanto, por vezes, é necessário complementar com um processo químico. Estes processos são dispendiosos, dependendo do tipo de equipamento utilizado e a necessidade de tratamento das emissões geradas (gases e fumos).
- Os **processos químicos**, comparativamente aos restantes métodos, apresentam uma elevada seletividade dos materiais recuperados (*wafer* de silício, metais – ex. prata, cobre, alumínio). No entanto, estes métodos implicam a realização de um pré-tratamento mecânico ou térmico e, além disso, exigem a utilização de produtos químicos de elevado custo, para além de ser necessário encaminhar para tratamento os resíduos gerados.
- A utilização de **processos combinados** (térmico e químico ou mecânico e químico) permite, por vezes, ultrapassar algumas das desvantagens associadas à utilização de apenas um método. Contudo, os custos associados são elevados (equipamento necessário para a sua realização) e a poluição gerada significativa (emissão de poeiras, gases e fumos, ruído e resíduos químicos).

Relativamente ao processo atual de montagem de PVPs:

- A utilização de cantoneiras com relevo dificultou o desmantelamento do caixilho e representa o maior obstáculo a nível industrial. Algumas das alternativas apresentadas para a montagem atual são descartadas, visto não garantirem melhoria significativa da eficiência do PVP que justifique o investimento, e não apresentarem melhorias no processo de reciclagem do mesmo.
- A remoção do caixilho consistiu num desafio, conseguida num topo pela passagem de um x-ato seguida de aplicação de força. Tentou-se o corte do vidro, mas verificou-se que este é temperado, tendo fissurado internamente. A caixa de junção foi removida da mesma forma que foi efetuado o desmantelamento do caixilho do topo.

A proposta mais promissora é a Proposta nº1. Contudo, com tudo aquilo que se retirou do trabalho laboratorial realizado, a Proposta nº2 pode ser considerada "otimizada", ou seja, o acrescento de uma etapa que aplica faca quente/ciclo térmico à amostra pode facilitar o processo de reciclagem e de reaproveitamento dos materiais. Falta, no entanto, perceber se esta etapa se revela fiável tecnicamente e financeiramente rentável. Estas vertentes não foram consideradas para este trabalho devido à escala a que o mesmo se realizou, não possibilitando a realização de testes e a consequente análise técnico-financeira. O potencial da proposta nº4 não foi testado em laboratório, mas não pode ser totalmente descartada, necessitando de testes e adaptação da mesa de corte para aferir todo o seu potencial.

Em conclusão, os diversos processos de desmantelamento de um PVP, as diferentes etapas para recuperação de componentes mais valiosos (como o silício e a prata) e as propostas apresentadas foram testadas apenas à escala Laboratorial. A adoção à escala industrial poderá envolver a necessidade de ajustes de forma a tornar os processos viáveis e rentáveis.

O presente Documento de Apoio foi elaborado pela Unidade de Ambiente e Segurança do CATIM, Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (eng. Cláudia Ribeiro e engª Inês Ribeiro).

REFERÊNCIAS

[1] DGEG, “Estatísticas rápidas - no178 - agosto de 2019,” 2019.

[2] IEA, “IEA - PVPS annual report 2018,” 2019.

[3] F. C. S. M. Padoan, P. Altimari, and F. Pagnanelli, “Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development,” Sol. Energy, vol. 177, no. July 2018, pp. 746–761, 2019.

[4] A. Paiano, “Photovoltaic waste assessment in Italy,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 41, pp. 99–112, 2015.

[5] P. Dias, S. Javimczik, M. Benevit, H. Veit, and A. M. Bernardes, “Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules,” Waste Manag., vol. 57, pp. 220–225, 2016.

[6] BIO Inteligence Service, “Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the weee diirective,” 2011.

[7] EPIA; Greenpeace, “Solar Generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world,” Amesterdão, 2011.

[8] Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, “Energia fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projeto e instalação,” 2004.

[9] S. Ito et al., “Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%,” Thin Solid Films, vol. 516, no. 14, pp. 4613–4619, 2008.

[10] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, and L. Han, “Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%,” Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett., vol. 45, no. 24–28, pp. 23–26, 2006.

[11] A. F. Sartori, “Variação temporal do desempenho de dye-sensitized solar cells,” Universidade de Aveiro, 2009.

[12] J. R. Bohland and I. I. Anisimov, “Recycling silicon photovoltaic modules,” US 6063995, 2000.

[13] S. Kang, S. Yoo, J. Lee, B. Boo, and H. Ryu, “Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules,” Renew. Energy, vol. 47, pp. 152–159, 2012.

[14] A. Doni and F. Dughiero, “Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling,” Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf., pp. 757–762, 2012.

[15] B. P. Song et al., “Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation,” Waste Manag., vol. 101, pp. 180–187, 2020.

[16] K. Hideaki Zenko, N. Ichiro Kataoka, and N. Hidenori Shiotsuka, “Sealing composition for sealing solar cell, and solar cell module and building materal-integral type solar cell module using said composition,” US 6693237 B2, 2004.

[17] K. Whitfield, Degradation Processes and Mechanisms of PV System Adhesives/Sealants and Junction Boxes. Underwriters Laboratories, Inc, 2019.

[18] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, and L. Mancini, “Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 156, pp. 101–111, 2016.

[19] IRENA and IEA-PVPS, “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” 2016.

[20] K. Komoto and J.-S. Lee, "End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies," International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2018.

[21] D. Ravikumar, P. Sinha, T. P. Seager, and M. P. Fraser, "An anticipatory approach to quantify energetics of recycling CdTe photovoltaic systems," Prog. photovoltaics Res. Appl., vol. 24, pp. 735–746, 2016.

[22] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, and C. M. Chong, "A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 109, no. April, pp. 532–550, 2019.

[23] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, and C. Yang, "Global status of recycling waste solar panels: A review," Waste Manag., vol. 75, pp. 450–458, 2018.

[24] T. Doi, I. Tsuda, H. Unagida, A. Murata, K. Sakuta, and K. Kurokawa, "Experimental study on PV module recycling with organic solvent method," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 67, no. 1–4, pp. 397–403, 2001.

[25] G. Granata, F. Pagnanelli, E. Moscardini, T. Havlik, and L. Toro, "Recycling of photovoltaic panels by physical operations," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 123, no. 2014, pp. 239–248, 2014.

[26] Y. Kim and J. Lee, "Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 98, pp. 317–322, 2012.

[27] J. R. Duflou, J. R. Peeters, D. Altamirano, E. Bracquene, and W. Dewulf, "Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery," CIRP Ann., vol. 67, no. 1, pp. 29–32, 2018.

[28] J. Zhang, F. Lv, L. Y. Ma, and L. J. Yang, "The status and trends of crystalline silicon PV module recycling treatment methods in Europe and China," Adv. Mater. Res., vol. 724–725, pp. 200–204, 2013.

[29] Y. Akimoto, A. Iizuka, and E. Shibata, "High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels," Miner. Eng., vol. 125, no. May, pp. 1–9, 2018.

[30] S. M. Nevala et al., "Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling," Waste Manag., vol. 87, pp. 43–50, 2019.

[31] M. F. Azeumo, G. Conte, N. M. Ippolito, F. Medici, L. Piga, and S. Santilli, "Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 193, no. January, pp. 314–319, 2019.

[32] F. Ardente, C. E. L. Latunussa, and G. A. Blengini, "Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling," Waste Manag., vol. 91, pp. 156–167, 2019.

[33] F. Del Pero, M. Delogu, L. Berzi, and M. Escamilla, "Innovative device for mechanical treatment of End of Life photovoltaic panels: Technical and environmental analysis," Waste Manag., vol. 95, pp. 535–548, 2019.

[34] J. Shin, J. Park, and N. Park, "A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 162, no. December 2016, pp. 1–6, 2017.

[35] J. Park, W. Kim, N. Cho, H. Lee, and N. Park, "An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: From separation to cell fabrication," Green Chem., vol. 18, no. 6, pp. 1706–1714, 2016.

[36] L. Frisson et al., “Recent improvements in industrial PV module recycling,” in European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2000.

[37] T. Y. Wang, J. C. Hsiao, and C. H. Du, “Recycling of materials from silicon base solar cell module,” Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf., pp. 2355–2358, 2012.

[38] E. Klugmann-Radziemska, “Current trends in recycling of photovoltaic solar cells and modules waste,” Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology, vol. 17, pp. 89–95, 2012.

[39] V. M. Fthenakis, “End-of-life management and recycling of PV modules,” Energy Policy, vol. 28, no. 14, pp. 1051–1058, 2000.

[40] M. Tammaro, J. Rimauro, V. Fiandra, and A. Salluzzo, “Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes,” Renew. Energy, vol. 81, pp. 103–112, 2015.

[41] V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, and G. Graditi, “End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process,” Waste Manag., vol. 84, pp. 91–101, 2019.

[42] V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, F. Corcelli, and G. Graditi, “Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials,” Waste Manag., vol. 87, pp. 97–107, 2019.

[43] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, J. I. Bilbao, and R. Corkish, “A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules,” in Solar Panels and Photovoltaic Materials, B. Zaidi, Ed. IntechOpen, 2018.

[44] F. Cucchiella, I. D’Adamo, and P. Rosa, “End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 47, pp. 552–561, 2015.

[45] E. Klugmann-Radziemska and P. Ostrowski, “Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules,” Renew. Energy, vol. 35, no. 8, pp. 1751–1759, 2010.

[46] E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski, K. Drabczyk, P. Panek, and M. Szkodo, “Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 94, no. 12, pp. 2275–2282, 2010.

[47] Y. K. Yi, H. S. Kim, T. Tran, S. K. Hong, and M. J. Kim, “Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules,” J. Air Waste Manag. Assoc., vol. 64, no. 7, pp. 797–807, 2014.

[48] B. Jung, J. Park, D. Seo, and N. Park, “Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal,” ACS Sustain. Chem. Eng., vol. 4, no. 8, pp. 4079–4083, 2016.

[49] A. Müller, K. Wambach, and E. Alsema, “Life cycle analysis of solar module recycling process,” Mater. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 895, no. May 2014, pp. 89–94, 2006.

[50] E. H. Yang, J. K. Lee, J. S. Lee, Y. S. Ahn, G. H. Kang, and C. H. Cho, “Environmentally friendly recovery of Ag from end-of-life c-Si solar cell using organic acid and its electrochemical purification,” Hydrometallurgy, vol. 167, pp. 129–133, 2017.

[51] S. Yousef, M. Tatariants, J. Denafas, V. Makarevicius, S. I. Lukošiūtė, and J. Kruopienė, "Sustainable industrial technology for recovery of Al nanocrystals, Si micro-particles and Ag from solar cell wafer production waste," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 191, no. December 2018, pp. 493–501, 2019.

[52] W. H. Huang and M. Tao, "A simple green process to recycle Si from crystalline-Si solar cells," 2015 IEEE 42nd Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2015, pp. 1–4, 2015.

[53] A. Kuczyńska-Łażewska, E. Klugmann-Radziemska, Z. Sobczak, and T. Klimczuk, "Recovery of silver metallization from damaged silicon cells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 176, no. October 2017, pp. 190–195, 2018.

[54] J. K. Lee et al., "Photovoltaic performance of c-Si wafer reclaimed from end-of-life solar cell using various mixing ratios of HF and HNO3," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 160, no. October 2016, pp. 301–306, 2017.

[55] F. Pagnanelli et al., "Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies," Waste Manag., vol. 59, pp. 422–431, 2017.

[56] W. H. Huang, W. J. Shin, L. Wang, W. C. Sun, and M. Tao, "Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules," Sol. Energy, vol. 144, pp. 22–31, 2017.

[57] L. Zhang and Z. Xu, "Separating and recycling plastic, glass, and gallium from waste solar cell modules by nitrogen pyrolysis and vacuum decomposition," Environ. Sci. Technol., vol. 50, no. 17, pp. 9242–9250, 2016.

[58] M. Goe and G. Gaustad, "Estimating direct climate impacts of end-of-life solar photovoltaic recovery," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 156, pp. 27–36, 2016.

[59] J. K. Lee et al., "Simple pretreatment processes for successful reclamation and remanufacturing of crystalline silicon solar cells," Prog. Photovoltaics Res. Appl., vol. 26, no. 3, pp. 179–187, 2018.

[60] V. Savvilotidou and E. Gidarakos, "Pre-concentration and recovery of silver and indium from crystalline silicon and copper indium selenide photovoltaic panels," J. Clean. Prod., vol. 250, p. 119440, 2020.

[61] Veolia, World premiere in recycling photovoltaic panels | Veolia. França: Veolia Group; Youtube, 2018.

[62] R. Unternehmensgruppe, Recycling of disused photovoltaic modules. Reiling Unternehmensgruppe; Youtube, 2019.

[63] P. Cycle, "ABOUT PV CYCLE," 2016. [Online]. Available: http://www.pvcycle.org/organisation/about/. [Accessed: 03-Feb-2020].

[64] P. Cycle, PV CYCLE - Recycling of silicon based PV modules. Bélgica: PV Cycle; Youtube, 2012.

[65] P. Sinha, S. Raju, K. Drozdiak, and A. Wade, "Life cycle management and recycling of PV systems," V Tech Power, pp. 47–48, 13-Dec-2017.

[66] K. Wambach, "Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe," 2017.

[67] C. C. Faircloth, K. H. Wagner, K. E. Woodward, P. Rakkwamsuk, and S. H. Gheewala, "The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand," Resour. Conserv. Recycl., vol. 143, pp. 260–272, Apr. 2019.

[68] N. S.r.l, "Company." [Online]. Available: http://www.nikesrl.com/en/company/. [Accessed: 05-Feb-2020].

[69] M. Toledo, “Curing kinetics of EVA using DSC, DMA and model free kinetics,” Mettler Toledo Thermal Analysis, pp. 1–5, 2011.

[70] DuPontTM, “DuPontTM Tedlar® Polyvinyl Fluoride (PVF) Films,” 2014.

[71] L. W. McKeen, “High-Temperature/High-Performance Polymers,” in The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers, 2014, pp. 209–238.

[72] H. Portugal, “Cabos solares para instalações fotovoltaicas,” Renováveis Magazine, vol. 39, p. 46, 2019.

[73] Amazon.it, “Cerniera mobile industriale in alluminio, raccordi ad angolo arbitrario per profili in alluminio 2020.: Amazon.it: Commercio, Industria e Scienza.” [Online]. Available: https://www.amazon.it/Cerniera-industriale-alluminio-raccordi-arbitrario/dp/B07TFBXPZ1. [Accessed: 10-Mar-2020].

[74] Sika, “Solar Solutions New Horizons in Sealing and Bonding for the Photovoltaic Industry.” .

[75] M. DeBergalis, “Fluoropolymer films in the photovoltaic industry,” J. Fluor. Chem., vol. 125, no. 8, pp. 1255–1257, 2004.

[76] A. Granta, “CES EduPack 2019.” 2019.

[77] J. Montgomery, “New PV Module Encapsulation Materials Led By New Cell Types,” Solar, 2013. [Online]. Available: https://www.renewableenergyworld.com/2013/06/12/new-pv-module-encapsulation-materials-led-by-new-cell-types/. [Accessed: 09-Jan-2020].

[78] O. Hasan and A. F. M. Arif, “Performance and life prediction model for photovoltaic modules: Effect of encapsulant constitutive behavior,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 122, pp. 75–87, 2014.

[79] L. Merlin, “Espátula elimina silicone,” https://www.leroymerlin.pt/, 2020. [Online]. Available: https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Pintura-e-drogaria/Isolamento-e-impermeabilizacao/Silicones/WPR_REF_12709095?gclid=CjwKCAjwvOHzBRBoEiwA48i6AnFi-SwWac1hd_r5Ep0qtMlzsoH7raE-wPWwCkss7RWpH0tBUNC5vxoC1NwQAvD_BwE. [Accessed: 10-Feb-2020].

[80] F. M. Limited, “Prata Futuros - Vista Geral,” https://pt.investing.com/commodities, 2020. [Online]. Available: https://pt.investing.com/commodities/silver. [Accessed: 28-May-2020].

[81] S. Jiang, K. Wang, H. Zhang, Y. Ding, and Q. Yu, “Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant,” Macromol. React. Eng., vol. 9, pp. 522–529, 2015.

[82] A. C. Marques, J. A. Labrincha, M. P. Seabra, and R. M. Novais, “Projeto WEEECYCLE: Estado da arte,” Aveiro, 2020.

[83] Topeca, “Mesa corte por fio quente para poliestireno,” 2020. [Online]. Available: https://pt.topeca.pt/index.php?route=product/product&product_id=2461&gclid=Cj0KCQjw7Nj5BRCZARIsABwxDKIVos1_qm3Fxv3eJOFcx_I2vmY4b32CGGgZ4VrUXAlC041RrxwGmUcaAuehEALw_wcB. [Accessed: 14-Aug-2020].

[84] Diana Maria Pereira Pedras da Cruz Lopes, “Estudo de Alternativas de Valorização de Resíduos de Etil-Vinil-Acetato (EVA) na Indústria do Calçado,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.