U.PORTO

MESTRADO
ECONOMIA E GESTÃO DO AMBIENTE

Energia Solar Fotovoltaica: Um estudo sobre os impactos ambientais e sociais do setor no contexto dos *European Sustainability Reporting Standards* (ESRS)

Maria Joana de Oliveira Gonçalves

M

2026

U.PORTO

FEP FACULDADE DE ECONOMIA E GESTÃO UNIVERSIDADE DO PORTO

Energia Solar Fotovoltaica: Um estudo sobre os impactos ambientais e sociais do setor no contexto dos *European Sustainability Reporting Standards* (ESRS)

Maria Joana de Oliveira Gonçalves

Tese

Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

Orientado por

Professor Doutor Manuel Castelo Branco

2026

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Manuel Castelo Branco, um agradecimento especial pela orientação dedicada, pelo incentivo constante e pela partilha de uma visão holística do conhecimento.

Aos docentes que me acompanharam ao longo deste mestrado, obrigada por terem estimulado o meu sentido crítico e por terem aberto novas janelas de conhecimento.

À minha família e aos meus amigos, o meu muito obrigada pelo apoio incondicional e pela compreensão, que foram um suporte constante durante esta etapa desafiante.

Resumo

A presente dissertação analisa os impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica, no contexto dos *European Sustainability Reporting Standards* (ESRS). Tendo em consideração a inexistência atual de normas setoriais específicas, este trabalho propõe-se desenvolver um instrumento de apoio à identificação de impactos ambientais e sociais potencialmente materiais, materializado numa matriz, tendo como objetivo apoiar o processo de avaliação da dupla materialidade pelas empresas do setor. Utilizando uma metodologia qualitativa de natureza exploratória, baseada numa revisão de literatura académica, normas internacionais e relatórios setoriais, foi construída uma matriz composta por 28 impactos (15 ambientais e 13 sociais), identificados segundo os temas e subtemas do Apêndice A do ESRS 1. Os resultados evidenciam que os impactos negativos se concentram maioritariamente nas fases a montante da cadeia de valor (extração e fabrico), enquanto os benefícios ambientais e sociais positivos predominam na fase de operação e utilização. Esta matriz constitui um contributo metodológico, permitindo às organizações do setor uma identificação mais estruturada dos seus impactos ambientais e sociais de acordo com os ESRS. O trabalho conclui com a identificação de desafios para investigação futura, nomeadamente a definição de métricas quantitativas e a integração da materialidade financeira.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica; Normas Europeias de Relato de Sustentabilidade (ESRS); dupla materialidade; relato de sustentabilidade; impactos sociais e ambientais.

Abstract

This dissertation analyses the environmental and social impacts of the solar photovoltaic industry within the context of the European Sustainability Reporting Standards (ESRS). Given the current lack of specific sector-based standards, this study proposes the development of a support tool for identifying potentially material environmental and social impacts, materialised in a matrix, aiming to support the double materiality assessment process for companies in the sector. Using a qualitative exploratory methodology based on a review of academic literature, international standards and industry reports, a matrix comprising 28 impacts (15 environmental and 13 social) was constructed, identified according to the topics and subtopics of Appendix A of ESRS 1. The results show that negative impacts are mainly concentrated in the upstream stages of the value chain (extraction and manufacturing), while positive environmental and social benefits predominate in the operation and use phase. This matrix constitutes a methodological contribution, allowing organizations in the sector to identify their environmental and social impacts more structurally in accordance with the ESRS. The work concludes with the identification of challenges for future research, namely the definition of quantitative metrics and the integration of financial materiality.

Keywords: Solar photovoltaic energy; European Sustainability Reporting Standards (ESRS); double materiality; sustainability reporting; social and environmental impacts.

Índice

1. Introdução 1

1.1 Enquadramento 1

1.2 Relevância da informação de sustentabilidade para as diferentes partes interessadas 2

1.3 Problema de Investigação 3

1.4 Objetivos e questões da investigação 4

1.5 Metodologia e abordagem de estudo 5

1.6 Estrutura da Tese 5

2. Revisão de Literatura 7

2.1. A Indústria Solar Fotovoltaica 7

2.1.1 Caracterização do setor e projetos fotovoltaicos de grande escala 7

2.1.2. A cadeia de valor de um projeto de energia solar fotovoltaica 9

2.1.3. Enquadramento conceptual da sustentabilidade no setor energético 11

2.2. Emissões evitadas 12

2.3. Impactos ambientais associados ao setor solar fotovoltaico 13

2.3.1 Redução da dependência de combustíveis fósseis 14

2.3.2 Emissões de gases com efeito de estufa 14

2.3.3 Consumo de energia 15

2.3.4 Poluição 16

2.3.5 Consumo e qualidade da água 16

2.3.6 Biodiversidade em projetos solares de larga escala 17

2.3.7 Uso dos solos 18

2.3.8 Economia circular 19

2.4. Impactos sociais associados ao setor solar fotovoltaico 21

2.4.1 Condições de trabalho 21

2.4.2 Criação de emprego 22

2.4.3 Igualdade de tratamento e de oportunidades para todos 23
2.4.4 Direitos humanos 23
2.4.5 Envolvimento da comunidade 23
2.5. Enquadramento regulamentar: European Sustainability Reporting Standards 25
2.5.1 European Sustainability Reporting Standards 25
2.5.2 Dupla materialidade como base do relato de sustentabilidade 26
3. Matriz de impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica no contexto dos ESRS 28
3.1 Descrição da Metodologia de Construção da Matriz 28
3.2 Análise da Matriz 29
4. Conclusão 32
5. Referências bibliográficas 35
Anexo — Matriz de impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica 42

Índice de Figuras

Figura 1 – Crescimento da capacidade de produção de energia renovável desde 2022 até 2030 e diferença para o objetivo do triplo da capacidade renovável.....8

Figura 2 – Produção de eletricidade por tipo de tecnologia (2000–2028).....8

Figura 3 – Cadeia de valor da indústria solar fotovoltaica..... 11

Figura 4 – Emissão de CO_2 na cadeia de valor da energia solar fotovoltaica..... 15

Figura 5 – Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos..... 20

Figura 6 – Impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica ao longo da cadeia de valor..... 29

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Síntese quantitativa da matriz dos impactos ambientais e sociais identificados na indústria solar fotovoltaica 31

Lista de Símbolos, Siglas e Abreviaturas

Sigla	Significado
Agri-PV	Agro-fotovoltaica
BOS	Balance of System
CO_2	Dióxido de carbono
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
EE	Emissões evitadas
EEE	Equipamentos elétricos e eletrónicos
EFRAG	European Financial Reporting Advisory Group
ESG	Environmental, Social and Governance
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
IROs	Impactos, riscos e oportunidades
GEE	Gases com efeito de estufa
GHG	Greenhouse Gases
GW	Gigawatt
IEA	International Energy Agency
IEA-PVPS	International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
kWh	Quilowatt-hora

LCA	Life Cycle Assessment
PV	Photovoltaic
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
Scope 1	Emissões diretas
Scope 2	Emissões indiretas provenientes da energia adquirida
Scope 3	Outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor
Scope 4	Emissões evitadas
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A tecnologia solar fotovoltaica emergiu com um potencial excecionalmente elevado de contribuição energética futura para uma escala de setor de sustentabilidade de vários terawatts até meados do século XXI (Choudhary & Srivastava, 2019). Alcançar estes vários terawatts é necessário para cumprir os objetivos do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a menos de 2 graus Celsius através de uma consequente descarbonização do sistema energético (Wade et al., 2018).

O conceito de desenvolvimento sustentável foi definido no Relatório Brundtland de 1987, "O Nosso Futuro Comum", da Comissão Mundial para o Ambiente e o Desenvolvimento, como desenvolvimento que responde às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de resposta das gerações futuras às suas próprias necessidades (World Commission on Environment and Development, 1987, p. 54). Foi então aceite, na generalidade, que o desenvolvimento sustentável deveria ser apoiado através de medidas sociais, ambientais e de crescimento económico, também conhecido como "triple bottom line" (Li et al., 2017).

As energias renováveis constituem uma resposta a este desafio, porque, ao contrário das fontes convencionais de geração de energia, permitem produzir energia sem esgotar os recursos fósseis. Ao mesmo tempo, as tecnologias de energias renováveis, como qualquer outro produto, têm de ser fabricadas. Implica que a energia e os materiais sejam utilizados no processo de produção (SolarPower Europe, 2021).

A aplicação do conceito de sustentabilidade no que diz respeito à produção de energia elétrica pode ser resumida como "aumentar o potencial de produção de energia elétrica continuamente, manter os resíduos resultantes dessa produção num nível que possa ser limpo de forma natural, manter os riscos relacionados com a saúde humana no menor nível

possível e realizar a produção de energia usando matérias-primas, incluindo recursos ambientais, no menor nível possível" (Onat & Bayar, 2010).

A implantação em larga escala da energia fotovoltaica é um pilar central na descarbonização dos sistemas energéticos e no alcance das metas climáticas. Embora a energia fotovoltaica esteja inerentemente associada à consciência ambiental, não está imune a riscos reputacionais nem isenta de responsabilidade pela transparência e liderança em sustentabilidade (Gervais et al., 2021).

1.2 Relevância da informação de sustentabilidade para as diferentes partes interessadas

Sendo a energia solar fotovoltaica projetada para ser a principal força para a descarbonização e para o combate às alterações climáticas, é fundamental considerar os impactos na sua implementação, de forma a assegurar transparência e responsabilidade desta tecnologia. A implantação exponencial de sistemas fotovoltaicos na última década levou ao aumento do interesse das partes interessadas no seu desempenho em matéria de sustentabilidade (Wade et al., 2018).

Nos últimos anos, tem-se assistido a uma expansão significativa do mercado de informação de sustentabilidade, particularmente entre a comunidade financeira. O crescimento dos produtos de investimento que visam especificamente o cumprimento de determinados padrões de sustentabilidade, a natureza mutável dos riscos empresariais e a sensibilização dos investidores para as ramificações financeiras destes riscos devido a questões ambientais, bem como a rápida evolução das preferências dos consumidores, das práticas de mercado e da sensibilização do público, contribuem para este aumento da procura (Fleacă et al., 2023).

Adicionalmente, Fleacă et al. (2023) dizem-nos que o relato de sustentabilidade garante valor a longo prazo para as partes interessadas em geral, melhora a imagem, a competitividade e a reputação, a flexibilidade na angariação de financiamento e a capacidade de resposta aos desafios do ambiente, a captação de apoios públicos, a transparência da empresa para contrapartes e reguladores, a lealdade dos colaboradores, bem como o desempenho nos mercados financeiros. Por fim, existe uma crescente exigência social por uma maior

transparência das organizações em relação à sustentabilidade, tanto em questões sociais como ambientais (Muriel et al., 2025).

1.3 Problema de Investigação

Tem-se assistido a um movimento notável no sentido da obrigatoriedade da divulgação de informação sobre sustentabilidade, para incentivar o comportamento corporativo responsável, bem como aumentar a fiabilidade das empresas aos olhos das partes interessadas, como investidores, bancos, clientes e consumidores (Muriel et al., 2025). Tal como dizem Operato et al. (2025), a sustentabilidade é uma preocupação relevante para organizações em todo o mundo, impulsionada por pressões regulatórias crescentes e pelas expectativas das partes interessadas.

A União Europeia (UE) está a liderar ativamente a transição para uma economia sustentável, ao implementar regulamentações que responsabilizam as empresas pelos seus impactos ambientais e sociais (Comissão Europeia, 2023). Um dos desenvolvimentos regulatórios mais significativos nesta área é a Diretiva de Relato de Sustentabilidade das Empresas, estabelecida pela Diretiva (UE) 2022/2464 do Parlamento Europeu e do Conselho, que entrou em vigor em 5 de janeiro de 2023 (Parlamento Europeu, & Conselho da União Europeia, 2022).

No seguimento desta diretiva, a Comissão Europeia adotou, em 31 de julho de 2023, o primeiro conjunto de *European Sustainability Reporting Standards* (ESRS) (Comissão Europeia, 2023). Estas normas foram posteriormente publicadas no Jornal Oficial da União Europeia através do Regulamento Delegado (UE) 2023/2772, de 31 de julho de 2023, em dezembro de 2023 (União Europeia, 2023).

No âmbito deste enquadramento, o European Financial Reporting Advisory Group (EFRAG) foi mandatado para desenvolver normas de relato de sustentabilidade, incluindo normas específicas por setor. No entanto, desenvolvimentos legislativos recentes, mais concretamente a Diretiva (UE) 2026/470 do Parlamento Europeu e do Conselho, publicada em 24 de fevereiro de 2026, estabelecem, no seu artigo 29.º, que as normas específicas por setor deverão ser suprimidas, a fim de evitar um aumento do número de pontos de dados

prescritos que as empresas são obrigadas a comunicar (Parlamento Europeu, & Conselho da União Europeia, 2026).

Esta alteração levanta questões relevantes quanto à qualidade da informação divulgada. Mynhardt et al. (2017) evidenciam que a falta de abordagens normalizadas no relato de sustentabilidade conduz à existência de múltiplas interpretações da informação divulgada, reduzindo a sua qualidade para os utilizadores. Adicionalmente, sugere que a materialidade em sustentabilidade deve ser definida com base nas especificidades de cada setor, sendo necessário identificar quais as questões relevantes e como devem ser medidas e reportadas.

Ainda dentro deste contexto, Eccles et al. (2012) sugerem que a identificação de questões materiais em sustentabilidade deve ser realizada ao nível setorial, uma vez que estas dependem das especificidades de cada setor.

As consequências, tal como referem Eccles et al. (2012), serão que, por um lado, as empresas não estão a gerir adequadamente questões de negócio importantes. Por outro lado, os riscos para as carteiras dos investidores, como a exposição às alterações climáticas, permanecem ocultos.

Dado tratar-se de um setor com características técnicas e impactos específicos como descrito no capítulo 2, a ausência de normas setoriais específicas na indústria da energia solar fotovoltaica configura, assim, uma lacuna no contexto da ESRS, colocando em risco a própria gestão do negócio e, consequentemente, colocando em risco as partes interessadas.

1.4 Objetivos e questões da investigação

Os ESRS são um instrumento jurídico distintamente holístico, concebido para melhorar a divulgação do desempenho em matéria de sustentabilidade das empresas em toda a União Europeia (UE) (Leal Filho et al., 2025).

Os ESRS visam garantir a qualidade da informação divulgada, exigindo que esta seja compreensível, relevante, verificável, comparável e representada de forma fidedigna (Parlamento Europeu, & Conselho da União Europeia, 2022). Mas como garantir que estes critérios são efetivamente respeitados, tendo em consideração a inexistência de um guia detalhado por cada setor? A probabilidade de ocorrer uma falha na análise por parte das

empresas pode constituir um elemento de elevado risco, tal como apresentado no capítulo anterior.

Face ao exposto, a presente tese tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um instrumento de apoio à identificação de impactos ambientais e sociais potencialmente materiais associados à indústria solar fotovoltaica, suscetível de apoiar as empresas no processo de avaliação da dupla materialidade previsto nos ESRS.

O desenvolvimento deste instrumento implica a identificação e sistematização dos impactos ambientais e sociais potencialmente materiais associados à indústria solar fotovoltaica ao longo da sua cadeia de valor, com base na literatura científica e setorial, e o seu enquadramento nos tópicos e subtópicos de sustentabilidade previstos nos ESRS.

1.5 Metodologia e abordagem de estudo

Nesta investigação, foi utilizada uma metodologia qualitativa de natureza exploratória com base numa revisão de literatura científica, normas internacionais e relatórios setoriais relevantes para a indústria solar fotovoltaica.

Procedeu-se à identificação e sistematização dos impactos ambientais e sociais associados à indústria solar fotovoltaica ao longo da respetiva cadeia de valor. Posteriormente, os impactos identificados foram relacionados com os tópicos e subtópicos constantes do Apêndice A do ESRS 1. Esta análise foi refletida numa matriz final que totalizou 28 impactos (15 impactos ambientais e 13 impactos sociais). Foi identificada, para cada um dos impactos, a sua tipologia (positivo/negativo), a fase da cadeia de valor e a sua fonte (artigo científico, normas internacionais e relatórios setoriais).

1.6 Estrutura da Tese

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, apresentados de seguida e de forma sucinta:

No capítulo 2 é realizada uma revisão de literatura, na qual é exposta uma caracterização do setor da indústria solar fotovoltaica e dos projetos solares de larga escala, bem como a

descrição da sua cadeia de valor desde montante a jusante. Em seguida, procede-se ao enquadramento conceptual no setor energético e são apresentados os impactos ambientais e sociais associados a este setor. Ainda no capítulo 2 é apresentado o enquadramento regulamentar deste estudo, centralizando-se nos European Sustainability Reporting Standards e no conceito da dupla materialidade.

O capítulo 3 apresenta a matriz dos impactos ambientais e sociais no contexto dos ESRS resultante da revisão de literatura do capítulo anterior, onde se apresenta com detalhe a metodologia utilizada e são analisados os resultados obtidos. Por último, as principais conclusões da investigação, destacando os contributos, limitações e sugestões para investigação futura, encontram-se no capítulo 4.

2. Revisão de Literatura

2.1. A Indústria Solar Fotovoltaica

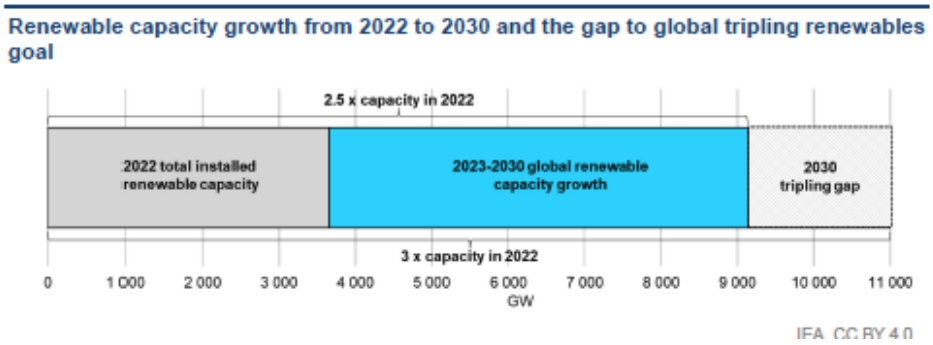
2.1.1 Caracterização do setor e projetos fotovoltaicos de grande escala

O Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas divulgou em 2023 o seu relatório síntese da sua sexta avaliação. O relatório sublinha, uma vez mais, que as atividades humanas, principalmente através das emissões de gases com efeito de estufa, causaram inequivocamente o aquecimento global, com a temperatura da superfície global a atingir 1,1°C acima de 1850-1900 em 2011-2020. As emissões globais de gases com efeito de estufa continuam a aumentar, com contribuições históricas e contínuas, decorrentes da utilização insustentável de energia, alterações do uso da terra, estilos de vida e padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro de cada país e entre indivíduos (IPCC, 2023).

O IPCC (2023) indica ainda que, em trajetórias compatíveis com a limitação do aquecimento global a 1,5°C, as emissões globais de gases com efeito de estufa são reduzidas em cerca de 43% até 2030, relativamente aos níveis de 2019, e que as emissões líquidas de CO_2 atingem zero por volta do início da década de 2050. Adicionalmente, o IPCC (2022) refere que a energia solar e a energia eólica apresentam o maior potencial técnico de mitigação, tendo os seus custos diminuído substancialmente ao longo da última década, sendo atualmente competitivos face aos combustíveis fósseis.

Para atingirmos a neutralidade carbónica em 2050, de acordo com o Relatório da Agência Internacional da Energia, será necessário o triplo da capacidade de produção da energia renovável em 2022, o que significa a produção de 11.000 GW (Figura 1). De acordo com as políticas e condições de mercado existentes, prevê-se que a capacidade renovável global atinja 7 300 GW até 2028 (International Energy Agency [IEA], 2024).

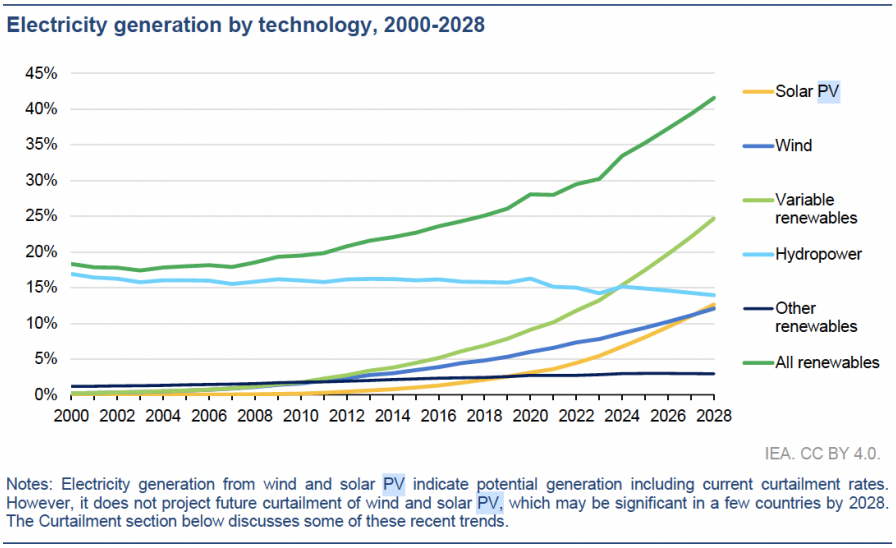
Figura 1: Crescimento da capacidade da produção de energia renovável desde 2022 até 2030 e a diferença para o objetivo do triplo da capacidade renovável.



Fonte: IEA (2024, p. 26).

Para triplicar a capacidade global de energia renovável, é necessário um crescimento muito mais rápido. Além disso, muitas economias emergentes e em desenvolvimento dependem principalmente da energia hidroelétrica. Isto significa que a energia solar fotovoltaica e a energia eólica deverão crescer mais de três vezes até 2030 para atingir a meta (IEA, 2024). De acordo ainda com o Relatório da Agência Internacional da Energia, o ritmo de crescimento da capacidade renovável na Europa mais do que duplicará em 2023-2028 em comparação com os seis anos anteriores, com acréscimos totalizando 532 GW (Figura 2). A energia solar fotovoltaica será responsável por mais de 70% desta expansão (IEA, 2024).

Figura 2: Produção de eletricidade por tipo de tecnologia (2000–2028)



Fonte: IEA (2024, p. 15).

Segundo o estudo da SolarPower Europe 100% Renewable Study, a eletricidade solar poderá fornecer mais de 60% da produção de eletricidade da Europa até 2050 (SolarPower Europe, 2021).

Verifica-se, desta forma, um crescimento rápido da energia solar; prevê-se que seja a principal fonte de eletricidade na Europa até 2050. Com o seu crescimento, a oportunidade de promover o desenvolvimento económico verde também aumenta. O desenvolvimento de uma cadeia de valor solar responsável, transparente e sustentável é fundamental para concretizar esta transição para energias limpas (Solar Stewardship Initiative, 2025).

Embora tenham sido feitos progressos tecnológicos significativos, muitas estimativas de cenários energéticos futuros ignoraram o papel crucial que a energia solar fotovoltaica pode desempenhar na exigência de emissões líquidas zero até 2050. Por exemplo, o desenvolvimento de fontes de energia limpa, como a tecnologia solar fotovoltaica, tem benefícios ambientais, sociais e económicos a longo prazo. Como tal, ter uma fonte de energia que não depende de importações, aumenta a segurança energética de um país; isto também tem efeitos de maior durabilidade, menos riscos ambientais e custos mais baixos (Jan et al., 2023).

Houve um progresso contínuo e notável nas tecnologias fotovoltaicas durante as últimas duas décadas, à medida que os governos e a indústria intensificaram os investimentos em energia solar. Economias de escala e melhorias na utilização de materiais e eficiências de processos e módulos contribuíram para reduções drásticas nos custos de produção e para reduzir a pegada ambiental (Frischknecht et al., 2020).

2.1.2. A cadeia de valor de um projeto de energia solar fotovoltaica

De acordo com Sinha et al. (2020), a cadeia de valor da indústria fotovoltaica inicia-se, a montante, pela produção da célula solar, que consiste nas seguintes etapas: extração de areia de sílica, produção de silício metalúrgico, produção de silício policristalino, moldagem de lingotes e produção de wafer de silício (Figura 3). Após a produção da célula, os componentes estruturais - cabos, quadros, folhas traseiras, filmes de encapsulamento, fitas e caixas de junção - complementam-na num módulo fotovoltaico inteiro.

Destaca-se a forte concentração da produção a montante na China, que representa 85,1% da produção de células fotovoltaicas e 96,8% da capacidade de produção de wafers de silício. Adicionalmente, estas fases são também as mais intensivas em CO_2: o fabrico de wafers emite 57% da pegada de carbono total do módulo fotovoltaico de referência, o que corresponde a 638,4 kg CO_2-eq/kW. Até à conclusão do fabrico das células, são emitidos 68% do total, o que equivale a 761,6 kg CO_2-eq/kW (Nyffenegger et al., 2024).

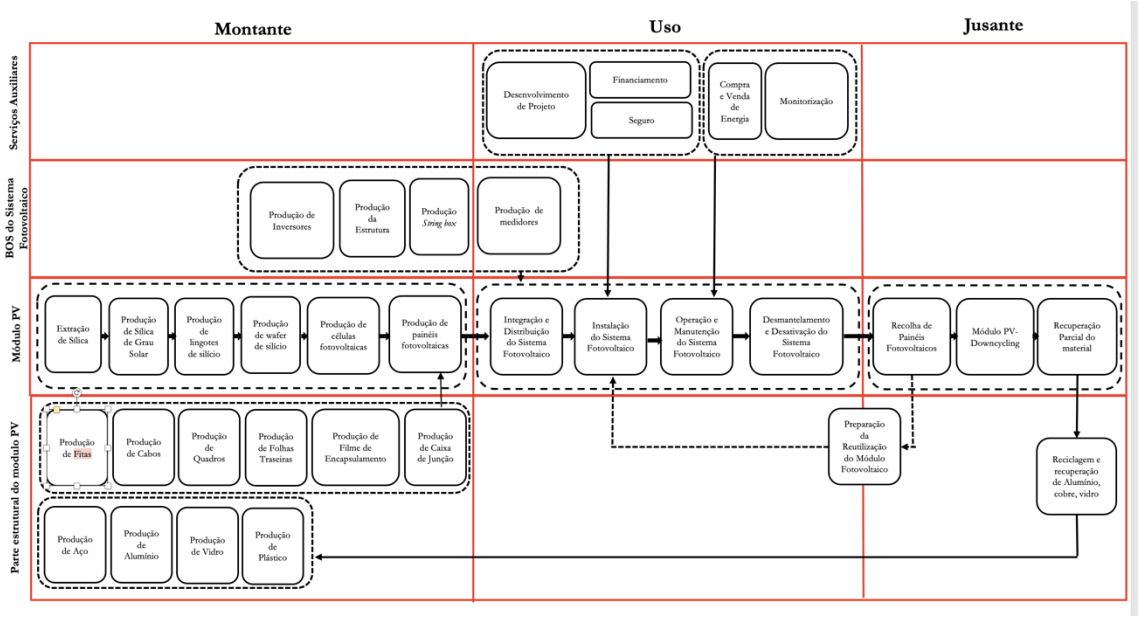
Na fase intermédia, Nyffenegger et al. (2024) descrevem que os módulos fotovoltaicos são montados através dos componentes do "*Balance of System*" (BOS), que englobam todos os equipamentos necessários ao funcionamento de um sistema fotovoltaico para além dos próprios módulos, tais como inversores, estruturas de suporte, cablagem e sistemas de proteção, para formar um sistema fotovoltaico. Existem também a instalação e serviços auxiliares, como gestão de projetos, financiamento e seguro. Posteriormente, ocorre a operação e manutenção, incluindo a compra e venda de energia e atividades de monitorização. A última fase consiste na desativação e desmontagem do sistema fotovoltaico assim que este atinge o final do seu ciclo de vida, onde os módulos são integrados com componentes do BOS.

De acordo ainda com Nyffenegger et al. (2024), a jusante, os módulos fotovoltaicos são recolhidos e reciclados. Uma vez desinstalados, são recolhidos, classificados, transportados e armazenados para cumprir os requisitos da Diretiva relativa aos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE). Uma pequena fração dos módulos fotovoltaicos potencialmente adequada para reutilização é testada e, se adequada para um segundo ciclo de vida, devolvida à cadeia de valor fotovoltaica para revenda e reinstalação na Europa. No entanto, uma quantidade considerável de módulos fotovoltaicos também é exportada para países não europeus para uso posterior e, portanto, nunca chega a instalações de reutilização ou reciclagem na Europa. Quando os módulos fotovoltaicos são reciclados na Europa, são maioritariamente reciclados a jusante e alguns materiais são recuperados da melhor forma possível nas etapas finais da cadeia de valor a jusante. Nessas etapas finais, podem distinguir-se quatro fases: (1) as partes estruturais são desmontadas, recicladas separadamente e os materiais, como alumínio e cobre, são recuperados; (2) a estrutura laminada do módulo fotovoltaico é aberta usando processos térmicos, químicos ou mecânicos, dependendo do material-alvo; (3) os diferentes materiais são classificados, agrupados e processados em etapas

de purificação ou extração; e (4) os diferentes grupos de materiais são submetidos a tratamentos de refinação para obter materiais finais de elevada pureza.

Atualmente, os materiais recuperados não são adequados como materiais de entrada para novos módulos fotovoltaicos, sendo alguns incinerados.

Figura 3: Visão geral da cadeia de valor da energia fotovoltaica



Fonte: Nyffenegger et al. (2024, p. 3).

A decomposição da cadeia de valor apresentada nesta secção constitui a base conceptual da matriz de impactos desenvolvida no Capítulo 3, permitindo associar cada impacto ambiental ou social à fase em que ocorre.

2.1.3. Enquadramento conceptual da sustentabilidade no setor energético

O desenvolvimento sustentável, no seu sentido mais amplo, ou seja, económico, social e ambiental, emergiu como um dos principais desafios para a humanidade no século XXI. A energia solar fotovoltaica surge como uma tecnologia-chave para cumprir não só as metas climáticas, mas também as relacionadas com o progresso social e o crescimento económico (Zafrilla et al., 2019). Por outro lado, a implantação exponencial de sistemas fotovoltaicos ao longo da última década levou a um aumento das partes interessadas no seu desempenho em matéria de sustentabilidade (Wade et al., 2018).

Nos últimos 15 anos, as práticas sustentáveis associadas à produção e eliminação de módulos fotovoltaicos têm sido um tema crescente de preocupação. A utilização de materiais críticos e tóxicos, os incidentes que ligam o fabrico fotovoltaico à poluição química e a regulamentação limitada dos resíduos fora da UE foram citados como pontos críticos no setor. Mais recentemente, as alegações de trabalho forçado na província de Xinjiang, na China, da qual a indústria solar global depende para o polissilício, vieram a público chamar a atenção para a falta de rastreabilidade nas cadeias de abastecimento. Fizeram eco das conclusões do Business & Human Rights Resource Centre de que a maioria das empresas de energias renováveis não fornece as políticas de direitos humanos necessárias para evitar o abuso das comunidades e dos trabalhadores (Gervais et al., 2021).

2.2. Emissões evitadas

As emissões evitadas referem-se a reduções de emissões de gases com efeito de estufa resultantes da utilização de um produto ou a remoções de emissões devido a uma decisão ou ação. Embora não exista uma norma uniforme para calcular as emissões evitadas, os intervenientes no mercado começaram a referir-se às emissões evitadas como emissões de âmbito 4 (Young-Ferris et al., 2025). De acordo com Liu e Wang (2025), as emissões de âmbito 4 definem-se como a quantidade de emissões decorrentes da substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia livres de carbono, do uso de produtos com pegada de carbono negativa ou de melhorias na eficiência e inovações tecnológicas que reduzam as emissões em relação a um cenário de referência definido.

O estudo de O'Keeffe e Brander (2025) identifica 48 metodologias para a quantificação de emissões evitadas publicadas desde 2005. No entanto, constata que uma parcela significativa das empresas não utiliza uma metodologia publicada ou cita o uso de metodologias inadequadas, o que coloca em dúvida a qualidade das divulgações sobre emissões evitadas. Com base nessa pesquisa, recomenda que o Greenhouse Gas (GHG) Protocol promova a padronização nessa área de contabilização.

De Giovanni (2025) refere que, apesar de o GHG Protocol ser útil para contabilizar os impactos operacionais e da cadeia de valor (scope 1, scope 2 e scope 3), esta estrutura convencional acaba por desconsiderar a possibilidade de contabilizar as emissões evitadas —

isto é, emissões que uma empresa deixa de gerar após iniciar a sua trajetória rumo à sustentabilidade. Estas emissões constituem uma categoria ainda não consolidada nas práticas convencionais de relato de GEE, mas que ganha crescente destaque em pesquisas e políticas de inovação climática.

Ainda que não constituam um impacto direto nos termos dos ESRS, é de enfatizar que, segundo Lorenzen e Scher (2020), os projetos de energias renováveis evitam as emissões ao substituir a geração baseada em combustíveis fósseis que, de outra forma, produziria eletricidade.

De acordo com World Business Council for Sustainable Development (2023), a ação climática exige que as empresas não só se adaptem a um mundo em transformação e descarbonização, mas também se tornem agentes de mudança. As empresas que trabalham para atingir o Net Zero enfrentam o duplo desafio de reduzir a sua própria pegada de GEE (Gases com Efeito de Estufa) enquanto desenvolvem soluções de baixo carbono que contribuem para esforços mais amplos de descarbonização, conhecidas como "emissões evitadas" (EE). As EE – poupanças de emissões obtidas através dos produtos e serviços de uma empresa – oferecem uma forma importante de acelerar a descarbonização através do desenvolvimento de produtos e serviços que ajudam outros intervenientes a reduzir o seu impacto climático.

2.3. Impactos ambientais associados ao setor solar fotovoltaico

O impacto ambiental de uma unidade de produção solar fotovoltaica requer uma perspetiva de sistema. Naturalmente, o impacto ambiental de cada componente é um critério de conformidade indispensável; no entanto, em última análise, é todo o sistema que precisa cumprir tão bem os critérios de sustentabilidade. Avaliar o impacto ambiental de qualquer produto ou sistema é uma tarefa complexa (Wade et al., 2021).

Embora as quotas de impacto ambiental das fases do ciclo de vida variem entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas, as fases de produção e construção continuam a ser as mais importantes em termos da sua contribuição para os impactos ambientais do ciclo de vida (Wade et al., 2018).

A viabilidade dos sistemas de energia solar, como a tecnologia solar fotovoltaica, a longo prazo, é determinada pelos seus impactos no meio ambiente. Em termos de impacto ambiental, as unidades de produção de energia solar são as que têm mais problemas durante as fases de montagem e descomissionamento. Depois de uma unidade de produção ser comissionada e colocada em serviço, causa poucos danos ambientais. Há mais benefícios ambientais com a tecnologia fotovoltaica baseada nos sistemas de energia solar durante a fase de montagem em comparação com outras tecnologias (Jan et al., 2023).

2.3.1 Redução da dependência de combustíveis fósseis

A energia solar fotovoltaica desempenha um papel crucial nos esforços mundiais de descarbonização para limitar o aumento da temperatura global, em consonância com o Acordo de Paris da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas. Como uma das fontes de eletricidade de crescimento mais rápido, a energia solar reduz significativamente as emissões de gases com efeito de estufa, ao aproveitar a energia do sol em vez de queimar combustíveis com elevadas emissões de carbono. A sua escalabilidade e os custos decrescentes fazem da energia solar uma componente essencial de qualquer estratégia de sustentabilidade, permitindo aos países atingir as suas metas climáticas e avançar para uma economia de baixo carbono (SolarPower Europe, 2024).

2.3.2 Emissões de gases com efeito de estufa

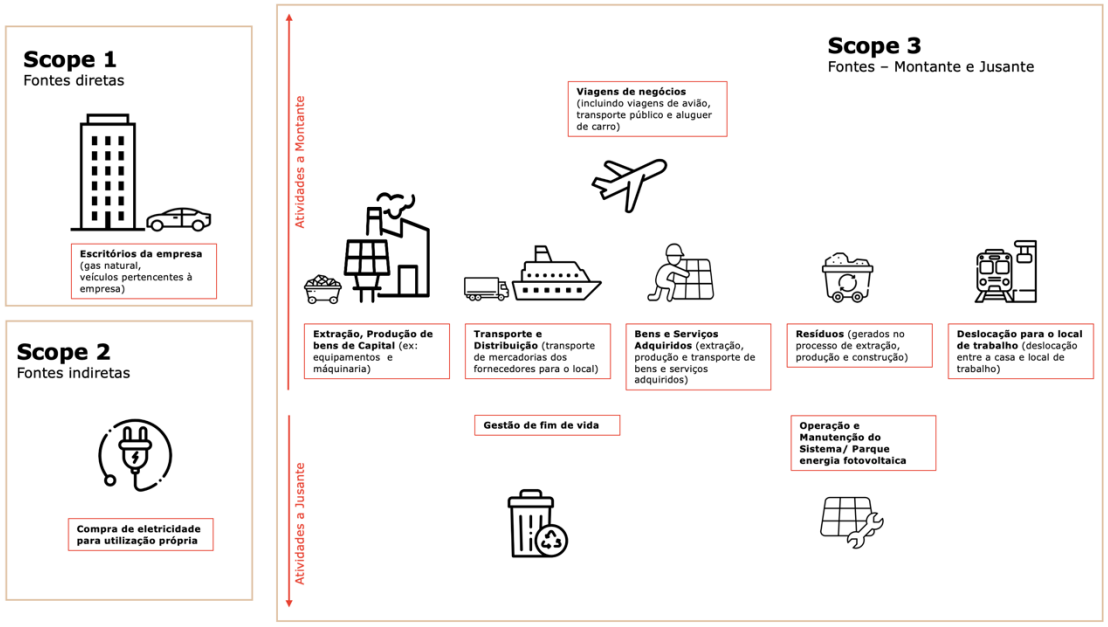
De acordo com Evans et al. (2009), no caso da energia solar fotovoltaica, a maior parte das emissões de carbono resulta da eletricidade utilizada durante o fabrico. De igual forma, Li et al. (2017) verificam, através da análise de ciclo de vida de um sistema de energia solar fotovoltaica de 4 kWp, montado num telhado, que as emissões ambientais são elevadas tanto na fase de aquisição de matérias-primas como na fase de fabrico.

De acordo com SolarPower Europe (2021), reduzir as emissões de carbono da energia solar fotovoltaica requer compreender as fontes de emissões de gases com efeito de estufa ao longo de toda a cadeia de valor solar, identificando todos os pontos críticos. Vários estudos demonstraram que a pegada de carbono por kWh de eletricidade solar é dominada pelas emissões de GEE ao nível do fabrico de componentes, incluindo o fabrico dos materiais utilizados em produtos fotovoltaicos. As emissões associadas à fase de distribuição, como o

transporte de produtos fotovoltaicos para o seu destino, são menores, mas relevantes, enquanto as emissões nas fases de planeamento, construção, instalação e operação são negligenciáveis. O desmantelamento de sistemas em fim de vida também não gera emissões significativas de gases com efeito de estufa. Em vez disso, oferece a possibilidade de reduzir a pegada de carbono através da reciclagem de componentes e materiais.

A Figura 4 reproduz a emissão de CO_2 na cadeia de valor da energia solar fotovoltaica, onde se conclui que a maior parte das emissões está incluída na categoria do Scope 3, o que exige, consequentemente, maior capacidade por parte da cadeia de valor de quantificar o seu impacto.

Figura 4: Emissão de CO_2 na cadeia de valor da energia solar fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria.

2.3.3 Consumo de energia

O fabrico de painéis solares utiliza normalmente energia elétrica comprada à rede. A energia pode representar uma fatia considerável do custo total de produção. Face ao aumento dos custos energéticos e à incerteza regulamentar relativamente ao futuro da energia fóssil, as empresas que diversificam as suas fontes de energia podem estar mais bem preparadas para gerir os riscos associados e manter um fornecimento de energia fiável. As empresas que

minimizam o seu consumo de energia através de uma gestão energética eficaz podem reduzir custos e obter vantagem competitiva através da eficiência operacional e da definição de preços competitivos dos seus produtos. Isto é particularmente importante dada a intensa concorrência de preços no setor da tecnologia solar (IFRS Foundation, 2023).

2.3.4 Poluição

Segundo Zafrilla et al. (2019), a energia solar fotovoltaica é quase livre de poluição direta, o que reduz a pressão das emissões de GEE e outros poluentes de risco para a saúde. Referem, todavia, que toda a cadeia de produção deve ser monitorizada, a fim de controlar e reduzir todas as emissões indiretas ao longo do ciclo de vida dos sistemas solares fotovoltaicos.

2.3.5 Consumo e qualidade da água

Muitas partes do mundo estão atualmente a lutar contra a escassez de água e, com o passar do tempo, fornecer fontes de água seguras irá tornar-se uma questão mais proeminente como resultado do aquecimento global (Khatami & Goharian, 2022).

É difícil obter dados precisos que quantifiquem o consumo de água durante a produção de eletricidade (Evans et al., 2009). A água é consumida na produção de módulos fotovoltaicos e aerogeradores; no entanto, é pouco utilizada durante a operação e manutenção, resultando num consumo de água muito baixo ao longo do ciclo de vida (Evans et al., 2009).

De acordo com Tawalbeh et al. (2021), o consumo de água durante os processos de fabrico e reciclagem é consideravelmente superior ao consumo de água durante a operação. Os processos de fabrico incluem o processamento de minerais, a extração, a purificação e a corrosão química. O consumo de água durante os processos de fabrico e reciclagem é consideravelmente superior ao consumo de água durante a operação. No entanto, observou-se que os sistemas fotovoltaicos têm a menor pegada hídrica em comparação com outras tecnologias (Tawalbeh et al., 2021).

2.3.6 Biodiversidade em projetos solares de larga escala

As centrais solares fotovoltaicas em grande escala proporcionam as economias de escala e os volumes necessários para acelerar a transição para fontes de energia limpas e renováveis e aumentar a competitividade em termos de custos da energia solar em comparação com as fontes de energia convencionais. Para colher esses benefícios de uma forma totalmente sustentável, é necessário considerar vários aspetos relacionados com os impactos da energia solar em grande escala na vida selvagem, na biodiversidade e na utilização dos solos (SolarPower Europe, 2021).

Embora os projetos de construção envolvam alguma perturbação dos habitats terrestres e da vida selvagem existentes, as centrais elétricas fotovoltaicas desenvolvidas de forma responsável, colocadas em locais apropriados, podem criar habitats e ajudar a proteger espécies animais e vegetais ameaçadas, proporcionando refúgio contra a contínua perturbação do solo que muitas vezes ocorre fora das cercas do projeto, em propriedades que se dedicam unicamente à agricultura (SolarPower Europe, 2021).

Os parques solares fotovoltaicos inclusivos para a natureza, com o objetivo de aumentar os ganhos líquidos de biodiversidade, podem ser uma solução importante para apoiar a flora e a fauna locais, restaurar ecossistemas degradados e oferecer fontes de energia limpas. Vários estudos indicam que as centrais de energia solar positivas para a natureza podem aumentar a biodiversidade em até 281%, aumentando a vida selvagem local e proporcionando um lar para uma vasta gama de espécies locais. Num estudo realizado num parque de energia solar fotovoltaica que combinou pastoreio de ovinos, os resultados revelaram um aumento das reservas de carbono até 80%. Além disso, os parques solares fotovoltaicos também podem proteger e fornecer abrigo para a vida selvagem durante condições climáticas extremas (SolarPower Europe, 2024).

Por outro lado, de acordo com Lorenzen e Scher (2020), o desenvolvimento das energias renováveis afeta o habitat da vida selvagem. Para além deste, pode também impactar diretamente as espécies através de colisões de aves e morcegos com painéis solares e de eletrocussão causadas por linhas de transmissão. Os impactos indiretos podem incluir projetos que provoquem desvios ou alterações nas rotas migratórias.

2.3.7 Uso dos solos

De acordo com Jungcurt et al. (2025), a transição prevista para a energia solar e outras energias renováveis poderá levar a um aumento significativo da intensidade do uso dos solos para a geração de eletricidade, em comparação com os combustíveis fósseis. Esta crescente pegada ambiental é composta não só pela ocupação direta de terrenos para parques e centrais de energia renovável, mas também pelas infraestruturas necessárias (por exemplo, estradas de acesso, linhas de transmissão, subestações de energia), o que pode ter um efeito adverso na conectividade ecológica e na prestação de serviços de ecossistemas.

Randle-Boggis et al. (2020) concluem que as alterações da utilização dos solos nos parques solares, sem dúvida, fornecem mais potencial do que qualquer outra alteração da utilização dos solos para proporcionar benefícios em termos de capital natural e serviços de ecossistema.

Evidência desta alteração benéfica do uso do solo é a que se verifica no desenvolvimento da atividade de agricultura fotovoltaica ("Agri-PV"). O princípio do Agri-PV é simples: a combinação inteligente de infraestrutura agrícola com uma instalação fotovoltaica. Esta combinação desbloqueia uma variedade de aplicações disruptivas que capitalizam as sinergias entre a energia solar e a agricultura. O Agri-PV permite que a energia solar seja combinada com atividades rurais e agrícolas específicas, fornecendo soluções para as necessidades dos agricultores e das comunidades rurais, impulsionando investimentos e criando empregos em áreas rurais, apoiando práticas agrícolas tradicionais e sustentáveis ou aumentando a resiliência climática das atividades agrícolas (SolarPower Europe, 2021).

Além disso, as aplicações solares, como a agrofotovoltaica ou a fotovoltaica flutuante, permitem a dupla utilização da terra, adicionando produção de energia a terrenos já utilizados para atividades económicas. Os projetos de energia solar fotovoltaica podem também proporcionar benefícios mais amplos para a terra, como o aumento da eficiência no uso da água, a proteção da flora e da fauna contra as intempéries, a melhoria da saúde do solo e o apoio aos ecossistemas naturais (SolarPower Europe, 2024).

De acordo com Jungcurt et al. (2025), os projetos de energia renovável podem ser adaptados, devido à sua escalabilidade inerente, a diversos contextos e integrados noutros usos produtivos da terra. Isto cria oportunidades para conceber sistemas e práticas de gestão que evitem, reduzam e revertam a degradação da terra, contribuindo simultaneamente para múltiplos objetivos de sustentabilidade.

2.3.8 Economia circular

Em tempos de alterações climáticas e de crescente escassez de recursos, a importância da sustentabilidade das tecnologias de energias renováveis está a aumentar. No entanto, a indústria fotovoltaica caracteriza-se por estruturas de economia linear, produção com utilização intensiva de energia, reciclagem descendente e pouca sustentabilidade. Um ponto de partida para as tecnologias sustentáveis é oferecido pela economia circular com os seus princípios de conceção circular (Schnatmann et al., 2022).

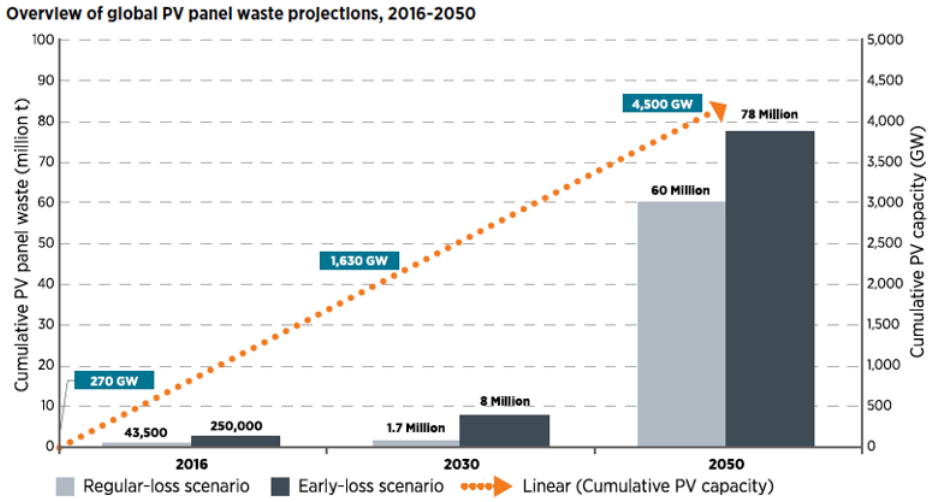
A ideia da economia circular é que cada material ou produto possa ser utilizado para algo novo no final da sua vida útil, criando assim valor acrescentado. Os materiais circulam em ciclos técnicos e biológicos. Os processos que podem fechar o ciclo e prolongar a vida útil são a reciclagem e os mecanismos de segunda vida, como a reparação e a reutilização. Atualmente, porém, as técnicas e os modelos empresariais na indústria fotovoltaica não estão suficientemente desenvolvidos para manter a qualidade dos materiais e produtos. Assim, na maioria dos casos, os processos resultam em downcycling (Schnatmann et al., 2022).

Weckend et al. (2016) apresentam no seu relatório as primeiras projeções globais para os futuros volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050, extraídas da IRENA & IEA-PVPS (Figura 5). Neste relatório, são investigados e comparados dois cenários para os volumes globais de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050:

• Perda regular: pressupõe uma vida útil de 30 anos para painéis solares, sem desgaste precoce e

• Perda antecipada: tem em consideração as falhas "infantis", "de meia-idade" e "desgaste" antes da vida útil de 30 anos.

Figura 5: Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos — 2016-2050



Fonte: IRENA & IEA-PVPS (2016, p. 12).

De acordo com Weckend et al. (2016), no cenário de perdas regulares, os resíduos de painéis fotovoltaicos representaram 43.500 t no final de 2016, com um aumento projetado para 1,7 milhões de toneladas em 2030. Um aumento ainda mais drástico, para cerca de 60 milhões de toneladas, poderia ser previsto para 2050. A projeção do cenário de perdas antecipadas estima fluxos totais de resíduos fotovoltaicos muito mais elevados, com 250.000 t até ao final de 2016. Esta estimativa subiria para 8 milhões de toneladas em 2030 e totalizaria 78 milhões de toneladas em 2050. Isto ocorre porque o cenário de perdas antecipadas pressupõe uma percentagem maior de falha precoce dos painéis fotovoltaicos do que o cenário de perdas regulares.

O aumento dos resíduos de painéis fotovoltaicos representa um novo desafio ambiental, mas também uma oportunidade sem precedentes para criar valor e procurar novas vias económicas. Estas incluem a recuperação de matérias-primas e o surgimento de novas indústrias de fim de vida solar fotovoltaica. Setores como a reciclagem fotovoltaica serão essenciais na transição mundial para um futuro energético sustentável, economicamente viável e cada vez mais baseado em energias renováveis. Para desbloquear os benefícios de tais indústrias, as bases institucionais devem ser lançadas a tempo de responder ao aumento esperado dos resíduos de painéis (Weckend et al., 2016).

As instalações solares fotovoltaicas devem ser adequadamente desmanteladas e os resíduos tratados e descartados no final da vida útil do projeto. No entanto, porque a maior parte dos quase 400 GW do mundo dos sistemas fotovoltaicos foram construídos na última década – cada um deve operar por entre 20 e 30 anos – os atuais volumes de resíduos de módulos fotovoltaicos ainda não justificam o funcionamento generalizado de instalações de reciclagem fotovoltaica. As políticas e tecnologias necessárias para a reciclagem de sistemas fotovoltaicos estão atualmente em rápido desenvolvimento. Com alterações aos resíduos elétricos europeus e diretiva relativa aos equipamentos eletrónicos (REEE 2012/19/UE) em 2012, retoma e reciclagem dos módulos fotovoltaicos já são, de facto, obrigatórios na Europa. Retomar e reciclar é atualmente realizado na Europa em quantidades pequenas, mas que aumentam anualmente (Wambach et al., 2017).

Estudos recentes concordam que a disponibilidade de materiais para os painéis fotovoltaicos não é uma grande preocupação a curto prazo, embora os materiais críticos possam impor limitações a longo prazo. Além disso, o aumento dos preços melhora a viabilidade económica das atividades de reciclagem e impulsionará o investimento em processos de mineração mais eficientes. Isto inclui a extração de metais utilizados no processo de fabrico de painéis fotovoltaicos, como prata, alumínio, cobre e estanho (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

2.4. Impactos sociais associados ao setor solar fotovoltaico

A energia solar continua a ser a opção mais atraente e sustentável para fornecer energia de baixo carbono à sociedade, mas exigirá planeamento cuidadoso, avaliação e prática para garantir que os impactos socioambientais sejam minimizados e distribuídos de forma equitativa (Mulvaney, 2019).

2.4.1 Condições de trabalho

Os módulos fotovoltaicos são projetados e testados para durabilidade a longo prazo em ambientes externos agressivos, mas uma pequena percentagem pode quebrar durante a instalação ou operação. Algumas partes interessadas da indústria expressaram preocupações em relação à potencial exposição humana a materiais perigosos caso um módulo fotovoltaico quebre no campo (Sinha et al., 2020).

A produção de células solares envolve diversos produtos químicos tóxicos, inflamáveis e explosivos. Muitos desses componentes representam um risco à saúde dos trabalhadores envolvidos na produção de células solares (Dubey et al., 2013). Por outro lado, a limpeza de superfícies semicondutoras durante a produção de células fotovoltaicas requer uma variedade de compostos perigosos e, como resultado, os trabalhadores correm o risco de inalar poeiras de silício (Jan et al., 2023).

As inovações mais avançadas em energia solar comercial, como a fotovoltaica de película fina, utilizam técnicas inicialmente desenvolvidas para a fabricação de ecrãs planos e discos rígidos. Esses processos recorrem a materiais que podem representar riscos ocupacionais e de saúde pública, como compostos de metais pesados de cádmio, gálio e índio, alguns dos quais podem ser tóxicos tanto nos seus compostos como na sua forma elementar (Mulvaney, 2019).

Embora o fabrico de semicondutores apresente diversos riscos ambientais, de saúde e segurança para os trabalhadores, a maioria pode ser gerida através das melhores práticas. No entanto, esta noção de melhores práticas apresenta uma ressalva importante, devido à distribuição desigual das leis laborais e da regulamentação ambiental, bem como à presença ocasional de agentes inescrupulosos. As condições de trabalho e os impactos ambientais da produção industrial podem ser significativamente piores em algumas economias em desenvolvimento, onde a regulamentação pode ser fraca, inexistente ou sem fiscalização; embora a ideia de que alguns países se tornaram paraísos de poluição industrial seja, em certa medida, controversa (Mulvaney, 2019).

2.4.2 Criação de emprego

A indústria de energia solar fotovoltaica consolidou-se de forma expressiva, criando diversos empregos em todo o mundo. O setor oferece diferentes empregos em inúmeras áreas, onde são necessárias diferentes competências. As diferentes oportunidades de emprego variam desde vagas altamente qualificadas e ligadas à pesquisa na empresa e na fabricação de produtos de energia solar até empregos que exigem um nível mínimo de experiência, como reparação de sistemas e processos de energia renovável (Apeh et al., 2022).

2.4.3 Igualdade de tratamento e de oportunidades para todos

Além de garantir condições de trabalho dignas, o setor solar reconhece a importância de promover um local de trabalho diversificado e inclusivo. A diversidade é definida como as dimensões de raça, etnia, género, orientação sexual, estatuto socioeconómico, idade, capacidades físicas, crenças religiosas, crenças políticas ou outras origens ou perspetivas diferentes. De acordo com a IRENA, a energia solar é a tecnologia de energia renovável mais equilibrada em termos de género, com as mulheres a representar 40% da força de trabalho solar (SolarPower Europe, 2024).

2.4.4 Direitos humanos

A natureza da energia solar fotovoltaica, como um produto global com uma cadeia de valor complexa, significa que o setor opera em regiões com contextos sociais, económicos, políticos e culturais muito diferentes. Independentemente da diversidade de geografias e condições das operações globais das empresas, as empresas de energia solar têm o dever de assegurar e promover o respeito pelos direitos humanos fundamentais, especificamente no que diz respeito aos direitos dos trabalhadores. Estas ações devem ser realizadas no âmbito das relações comerciais com empreiteiros, fornecedores e quaisquer outros parceiros, com especial incidência em contextos de conflito e de alto risco (SolarPower Europe, 2021).
Como um setor que se esforça para o mais alto padrão de sustentabilidade, a indústria solar deve permanecer vigilante em toda a sua cadeia de suprimentos para atender aos padrões globais de direitos humanos (SolarPower Europe, 2021).

2.4.5 Envolvimento da comunidade

Envolver a comunidade corretamente é fundamental para qualquer projeto de energia renovável. Um envolvimento comunitário eficaz promove a confiança, um sentimento de propriedade partilhada e orgulho pelo projeto. Um envolvimento ineficaz pode gerar oposição e atritos com a comunidade local (Lorenzen & Scher, 2020).
O "envolvimento comunitário" é o primeiro passo no processo de compreensão dos riscos e das necessidades da comunidade. Abrange um amplo espectro de atividades, desde a pesquisa e consultas com as partes interessadas até à comunicação e partilha de benefícios (Lorenzen & Scher, 2020).

Os impactos e benefícios para a comunidade também dependem muito da localização e das necessidades da comunidade. As comunidades próximas do local do projeto são geralmente as que são diretamente impactadas pelo mesmo. No entanto, as comunidades ao longo de toda a cadeia de valor do projeto também podem beneficiar. Por exemplo, a comunidade imediata pode ser apenas o local específico onde um projeto está localizado, mas o promotor e o comprador podem desenvolver um plano comunitário que partilhe os benefícios económicos com toda a região ou com a comunidade envolvente de uma instalação do comprador. Por esta razão, a estratégia geral da comunidade pode ser única e inovadora (Lorenzen & Scher, 2020).

Ao substituir a geração de energia proveniente de centrais termoelétricas a combustíveis fósseis, os projetos de energia renovável podem reduzir os poluentes atmosféricos nocivos (Lorenzen & Scher, 2020). A transição global para as energias renováveis, combinada com a crescente urbanização dos territórios europeus, intensifica a concorrência pela terra. A situação torna-se especialmente difícil para os países com elevadas densidades populacionais e elevado consumo de eletricidade per capita. Por um lado, a escassez de terra leva a conflitos com o uso da terra existente. Por outro lado, as pessoas estão a desenvolver resistência ao desenvolvimento de novas plantas na sua área, apesar de apoiarem fundamentalmente as energias renováveis – a chamada oposição "NIMBYism" – Not In My Backyard (SolarPower Europe, 2021).

Ao desenvolver projetos de energia solar fotovoltaica, é necessário reforçar as considerações sobre a utilização adequada da terra e da água para evitar a possibilidade de violações dos direitos humanos (IRENA, 2024).

O envolvimento da comunidade no desenvolvimento de projetos de energia solar fotovoltaica fomenta o apoio local e garante que o projeto esteja alinhado com as necessidades e valores da região, resultando em maior aceitação e sucesso a longo prazo. Além disso, o envolvimento da comunidade pode criar oportunidades económicas locais e fortalecer a confiança entre desenvolvedores e moradores (SolarPower Europe, 2024).

A combinação do desenvolvimento das energias renováveis com a gestão sustentável da terra, da água e das pastagens pode também apoiar múltiplos objetivos socioeconómicos e

de desenvolvimento. Por exemplo, podem fornecer alternativas de energia limpa a milhões de pessoas que ainda não têm acesso à eletricidade e dependem da biomassa tradicional para cozinhar. O acesso facilitado a energia de baixo custo a nível agrícola e comunitário fornece um apoio crucial para a gestão sustentável da água na agricultura, máquinas agrícolas com emissões zero e processamento e armazenamento de alimentos que podem reduzir a perda de alimentos, melhorar a integração da cadeia de abastecimento e aumentar a resiliência das comunidades (Jungcurt et al., 2025).

2.5. Enquadramento regulamentar: European Sustainability Reporting Standards

2.5.1 European Sustainability Reporting Standards

Em resposta à necessidade de regras globais abrangentes de divulgação de sustentabilidade, foram desenvolvidas normas de sustentabilidade por parte de várias organizações. Entre eles, destacam-se, recentemente, a nível europeu, os ESRS. De acordo com a Comissão Europeia (2026), estas normas especificam as informações sobre sustentabilidade que as empresas são obrigadas a divulgar em conformidade com a Diretiva 2013/34/UE (Diretiva Contabilística), com a redação que lhe foi dada pela Diretiva (UE) 2022/2464 (Diretiva de Relato de Sustentabilidade das Empresas - CSRD) e pela Diretiva (UE) 2026/470 (Diretiva Omnibus I).

As normas abrangem toda a gama de questões ambientais, sociais e de governação, incluindo alterações climáticas, biodiversidade e direitos humanos. Fornecem informações para que os investidores entendam o impacto na sustentabilidade das empresas em que investem. Têm igualmente em conta as discussões com o International Sustainability Standards Board (ISSB) e a Global Reporting Initiative (GRI) a fim de assegurar um elevado grau de interoperabilidade entre as normas da UE e mundiais e evitar a dupla comunicação desnecessária por parte das empresas (Comissão Europeia, 2023).

Na sua declaração de sustentabilidade, a empresa deve divulgar as informações sobre os impactos, riscos e oportunidades materiais, organizadas em função dos temas a que se referem. Estas informações devem abranger as seguintes áreas de comunicação de informações: a) governação, b) estratégia, incluindo os efeitos financeiros, c) a gestão dos

impactos, riscos e oportunidades (IROs), incluindo as políticas e ações conexas, e d) as métricas e metas (Comissão Europeia, 2026).

De acordo com Voráček (2025), os ESRS estão divididos em três categorias principais de normas. A primeira categoria compreende as normas transversais, que incluem a ESRS 1 e a ESRS 2. As normas transversais (ESRS 1 e ESRS 2) estabelecem os requisitos gerais de relato e a metodologia - incluindo definições de termos-chave, como cadeia de valor - e fornecem uma estrutura para a divulgação de informações sobre diversos temas. A segunda categoria abrange as normas temáticas, incluindo todas as normas nas áreas ambiental, social e de governança. Especificamente, as áreas contempladas incluem mudanças climáticas (ESRS E1), poluição (E2), recursos hídricos e marinhos (E3), biodiversidade e ecossistemas (E4), recursos e economia circular (E5), bem como temas sociais como força de trabalho própria (S1), força de trabalho na cadeia de valor (S2), comunidades afetadas (S3), consumidores e usuários finais (S4) e conduta empresarial (G1).

Ainda de acordo com Voráček (2025), cada categoria descreve os requisitos para a divulgação de impactos, riscos, oportunidades e medidas adotadas. Estabelece ainda a Comissão Europeia (2026) que, no geral, a declaração de sustentabilidade tem por objetivo apresentar de forma apropriada todos os IROs materiais relacionados com a sustentabilidade da empresa e a forma como esta os gere. As informações comunicadas devem ser úteis para a tomada de decisões dos utilizadores de declarações de sustentabilidade de caráter geral.

2.5.2 Dupla materialidade como base do relato de sustentabilidade

O conceito de dupla materialidade, conforme delineado pelas ESRS, exige que as empresas considerem duas perspetivas distintas ao avaliar o impacto das suas atividades de negócios. Esse conceito abrange tanto a materialidade financeira — também conhecida como materialidade *outside-in* (de fora para dentro) — quanto a materialidade de impacto, também conhecida como materialidade *inside-out* (de dentro para fora). A materialidade financeira concentra-se na análise de riscos e oportunidades ESG que impactam o desempenho financeiro da empresa (Voráček, 2025).

De acordo com Comissão Europeia (2026), a empresa deve comunicar informações sobre um determinado tema do ponto de vista de um impacto se esse tema respeitar aos impactos materiais reais ou potenciais, positivos ou negativos, da empresa nas pessoas ou no ambiente a curto, médio e longo prazo. Os impactos incluem os que estão relacionados com as operações e a cadeia de valor a montante e a jusante da empresa, nomeadamente através dos seus produtos e serviços, bem como das suas relações comerciais na sua cadeia de valor a montante e a jusante. No que toca aos impactos negativos reais, a materialidade deve ser avaliada com base na gravidade do impacto. Quanto aos impactos negativos potenciais, a materialidade deve ser avaliada com base numa combinação de gravidade e probabilidade. A avaliação da gravidade deve basear-se nos seguintes fatores: a escala, o âmbito e o caráter irremediável do impacto. No caso de um impacto negativo potencial nos direitos humanos, a gravidade do impacto prevalece sobre a sua probabilidade. Em relação aos impactos positivos reais, a materialidade deve ser avaliada com base na escala e no âmbito do impacto. Já a materialidade dos impactos positivos potenciais deve ser avaliada com base na escala, no âmbito e na probabilidade do impacto.

Por outro lado e também de acordo com Comissão Europeia (2026), a empresa deve comunicar informações sobre um tema do ponto de vista da materialidade financeira e o mesmo desencadear, ou for razoavelmente suscetível de desencadear, efeitos financeiros materiais. É o caso quando os riscos ou oportunidades relacionados com um tema têm, ou forem razoavelmente suscetíveis de ter, uma influência significativa, no desenvolvimento, na situação financeira, no desempenho financeiro, nos fluxos de caixa, no acesso ao financiamento ou no custo de capital da empresa a curto, médio ou longo prazo.

3. Matriz de impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica no contexto dos ESRS

Tal como descrito no capítulo 1, foi elaborada, com base na revisão de literatura científica, normas internacionais e relatórios setoriais relevantes para a indústria solar fotovoltaica anteriormente apresentada, uma matriz de impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica (Anexo). Esta matriz tem como objetivo constituir um instrumento de apoio às empresas do setor da energia solar fotovoltaica na identificação dos seus impactos ambientais e sociais aquando da avaliação da dupla materialidade. Esta matriz totalizou 28 impactos (15 impactos ambientais e 13 impactos sociais).

3.1 Descrição da Metodologia de Construção da Matriz

Foram analisados 24 documentos, incluindo artigos científicos, normas internacionais e relatórios setoriais, resultantes da pesquisa no Google Scholar e Web of Science, dos quais foram extraídos os impactos sociais e ambientais. Posteriormente, estes foram mapeados de acordo com os tópicos e subtópicos estabelecidos no Apêndice A - Lista de temas pertencente ao ESRS 1. Cada documento foi analisado para identificar impactos ambientais e sociais, respetiva fase da cadeia de valor, natureza do impacto e correspondência com os ESRS.

O Apêndice A, pertencente aos ESRS, foi utilizado como base deste trabalho, uma vez que esta lista de temas também é utilizada, de igual forma, como potencial instrumento de partida para a avaliação da dupla materialidade.

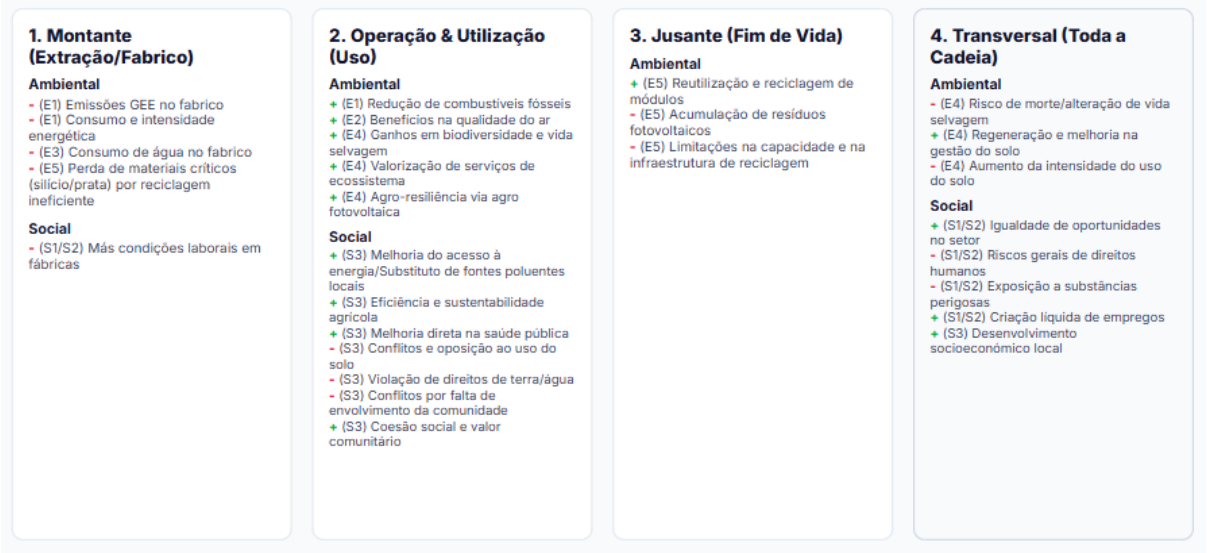
Com base no estabelecido nos ESRS 1, foi identificada, para cada um dos impactos, a sua tipologia (positivo/negativo). Foram considerados sobretudo os impactos descritos na diferente literatura, não sendo possível, por isso, segregá-los em impactos reais e potenciais, tal como estabelecido pela norma. Foram considerados os impactos descritos relativos às pessoas e ao ambiente. Foi também alocada a fase da cadeia de valor, considerando-se as atividades a montante (extração de matérias-primas e fabrico), as atividades de uso e operação dos sistemas fotovoltaicos e as atividades a jusante, relacionadas com o fim de vida, reutilização e reciclagem dos equipamentos de acordo com a estrutura definida no Capítulo

2.1.2., estabelecida por Nyffenegger et al. (2024). Por último, foi adicionada a informação relativa à fonte, agrupando-se em três categorias: artigos científicos, normas internacionais e relatórios setoriais.

3.2 Análise da Matriz

Tendo em consideração os resultados apresentados pela matriz, foi projetada a Figura 6, onde é possível observar, de forma mais direta, os diferentes impactos ao longo da cadeia de valor.

Figura 6: Impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica ao longo da cadeia de valor



Fonte: Elaboração própria.

Podemos observar, no que respeita ao domínio ambiental, uma maior relevância de impactos associados ao tópico ESRS E4 (Biodiversidade e Ecossistemas), onde foram identificados seis impactos. Em seguida, os tópicos ESRS E1 (Alterações Climáticas) e ESRS E5 (Utilização de Recursos e Economia Circular), onde foram identificados três impactos em cada um. De facto, e como vimos em capítulos anteriores, os impactos associados à biodiversidade são predominantemente positivos (identificaram-se quatro impactos positivos no total de seis).

Podemos verificar também que os impactos ambientais negativos se encontram nas fases a montante da cadeia de valor, nomeadamente na extração e fabrico dos componentes fotovoltaicos. Estão incluídas as emissões de gases com efeito de estufa associadas aos processos produtivos, o consumo energético intensivo, o consumo de água no fabrico dos painéis e a extração de matérias-primas críticas, como o silício, a prata e o alumínio. Foram ainda identificados impactos relacionados com o aumento da intensidade de utilização dos solos e com potenciais efeitos negativos sobre a fauna e os habitats naturais.

Por outro lado, verifica-se que os impactos positivos se concentram sobretudo na fase de operação e utilização dos sistemas fotovoltaicos, destacando-se a redução da dependência de combustíveis fósseis associada aos benefícios na qualidade do ar, bem como os benefícios em biodiversidade e vida selvagem, a valorização dos serviços dos ecossistemas e a resiliência climática proporcionada por soluções como a agrofotovoltaica. Este resultado é coerente, uma vez que os principais benefícios da tecnologia solar fotovoltaica se manifestam durante a fase de operação, através da produção de eletricidade a partir de uma fonte renovável.

No que diz respeito ao fim de vida dos sistemas fotovoltaicos, a matriz evidencia a acumulação de resíduos fotovoltaicos e as limitações atuais das infraestruturas de reciclagem como fatores que podem comprometer a circularidade do setor. Por outro lado, a recuperação e reutilização de materiais provenientes dos módulos fotovoltaicos surgem como impacto positivo para reduzir a pressão sobre os recursos naturais.

No que respeita aos impactos sociais, estes abrangem os tópicos ESRS S1, ESRS S2 e ESRS S3. A matriz destaca as más condições laborais em fábricas durante a fase de fabrico. Os conflitos relacionados com o uso do solo, a oposição das comunidades locais e a utilização inadequada de recursos naturais são gerados aquando da operação e utilização. Os impactos transversais a toda a cadeia traduzem-se nos riscos gerais de direitos humanos e exposição a substâncias perigosas.

No que respeita aos impactos positivos, destacam-se a criação líquida de emprego, o desenvolvimento socioeconómico local e a igualdade de oportunidades do setor como impactos positivos transversais a toda a cadeia de valor. O maior número de impactos

positivos sociais é encontrado na fase de operação e utilização, tal como foi identificado nos impactos ambientais. Nesta fase, encontramos os benefícios para a saúde pública decorrentes da redução da poluição atmosférica. Encontramos ainda o facto de o envolvimento adequado das comunidades poder contribuir para o reforço da coesão social e para a criação de valor partilhado entre os promotores dos projetos e as diferentes partes interessadas locais. Por fim, a melhoria do acesso à energia.

Em síntese, foi elaborada a tabela abaixo, condensando de forma quantitativa o resultado da matriz.

Tabela 1 — Síntese quantitativa da matriz dos impactos ambientais e sociais identificados na indústria solar fotovoltaica.

Dimensão	**Impactos Positivos**	**Impactos Negativos**	**Fases da Cadeia de Valor Mais Relevantes**
Ambiental	7	8	Montante e Operação & Utilização
Social	7	6	Toda a cadeia de valor (predomínio na Operação & Utilização)
Total	**14**	**14**	—

Fonte: Elaboração própria.

Pela análise da Tabela 1, verificamos que, na dimensão ambiental, foram identificados sete impactos positivos e oito negativos. Confirma-se, tal como referido anteriormente, que a maior parte dos impactos positivos está associada à fase de utilização dos sistemas fotovoltaicos. De igual forma, confirma-se que os impactos negativos se concentram sobretudo na fase a montante da cadeia de valor. Por outro lado, verificamos que, na dimensão social, foram identificados sete impactos positivos e seis negativos, estando concentrados de igual forma na fase de operação e utilização.

4. Conclusão

A presente investigação teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um instrumento de apoio à identificação de impactos ambientais e sociais potencialmente materiais associados à indústria solar fotovoltaica, suscetível de apoiar as empresas no processo de avaliação da dupla materialidade previsto nos ESRS. Para esse efeito, procedeu-se à identificação e sistematização dos impactos ambientais e sociais associados ao setor ao longo da sua cadeia de valor e ao respetivo enquadramento nos tópicos e subtópicos de sustentabilidade previstos nos ESRS. Este objetivo teve como referência o estabelecido pela Comissão Europeia (2026), segundo a qual, para assegurar uma representação fiel, a empresa deve apresentar uma representação completa, neutra e exata dos seus IROs materiais.

Com base nesta premissa, foi desenvolvido um trabalho extensivo de revisão de literatura que se centrou na identificação de impactos ambientais e sociais potencialmente materiais associados à indústria solar fotovoltaica ao longo da cadeia de valor.

O resultado desta investigação traduziu-se na elaboração de uma matriz que teve por base os princípios estabelecidos pela ESRS 1, que determina que as empresas devem identificar os IROs. De facto, ainda que o Apêndice A do ESRS 1 disponibilize uma lista de tópicos e subtópicos de sustentabilidade, os ESRS não identificam quais os impactos específicos para cada setor de atividade. Todavia, a Comissão Europeia (2026) refere que, ao elaborar as suas divulgações específicas da entidade, a organização pode utilizar as melhores práticas, estruturas ou normas de relato disponíveis, tais como as orientações setoriais das IFRS e as Normas GRI (incluindo as normas temáticas e setoriais da GRI).

Neste contexto, a matriz desenvolvida no âmbito deste estudo, ao seguir a estrutura dos ESRS definida no Apêndice A, constitui um instrumento metodológico de apoio às empresas no processo de avaliação da dupla materialidade previsto nos ESRS, contribuindo para colmatar parcialmente esta lacuna.

A análise desta matriz permite-nos, assim, verificar a forma como os impactos se distribuem pelos diferentes tópicos de sustentabilidade previstos nos ESRS, não tendo como objetivo determinar os impactos para uma empresa específica. Constitui, portanto, um ponto de partida para a avaliação de dupla materialidade de cada organização.

Concluímos, pela análise da matriz, a importância de se aprofundar o estudo a toda a cadeia de valor, não se limitando somente à fase de operação. Efetivamente, apesar do benefício adquirido através das emissões evitadas pela produção de eletricidade, uma parte relevante dos impactos ocorre nas etapas iniciais da cadeia de valor, o que reforça a relevância da consideração desta na avaliação da dupla materialidade.

Uma das principais limitações deste estudo prende-se com o facto de não ter sido realizada a avaliação de materialidade financeira dos impactos identificados, isto é, não foi tido em consideração como estes impactos se podem traduzir em riscos ou oportunidades relacionados que possam ter uma influência significativa no desenvolvimento, na situação financeira, no desempenho financeiro, nos fluxos de caixa, no acesso ao financiamento ou no custo de capital da empresa a curto, médio ou longo prazo.

Uma outra limitação está relacionada com a não inclusão da definição de métricas ou indicadores que permitam fazer uma avaliação quantitativa destes impactos. A definição de métricas constitui uma parte fundamental da implementação dos ESRS, permitindo avaliar a magnitude dos impactos, constituindo um apoio fundamental à comparabilidade e, consequentemente, à avaliação da evolução da empresa no que respeita a matérias de sustentabilidade.

Será importante ainda mencionar que muitas empresas do setor das energias renováveis desenvolvem atividades em diferentes tecnologias de produção de energia (eólica, hidroelétrica, geotérmica, produção de hidrogénio verde, etc.) e apresentam a sua declaração de sustentabilidade de forma consolidada, conforme previsto nos ESRS. Este contexto potencia que a informação reportada reflita os IROs como um todo, podendo criar dificuldades na identificação dos impactos específicos associados à atividade de produção de energia solar fotovoltaica, criando um desafio para a avaliação da dupla materialidade ao nível de uma tecnologia específica.

Como desafios de investigação futura, seria relevante desenvolver uma avaliação da materialidade financeira dos impactos identificados, proporcionando assim um instrumento de apoio ainda mais abrangente ao relato de sustentabilidade. Por outro lado, seria ainda importante, para investigação futura, realizar um estudo empírico dos relatórios de

sustentabilidade de empresas do setor com base na matriz desenvolvida, permitindo validar se os impactos específicos identificados são divulgados de forma independente ou se se encontram agregados com impactos de outras atividades desenvolvidas. Constitui ainda um estudo relevante desenvolver uma investigação relativamente a indicadores e métricas associados a cada impacto, em linha com os requisitos previstos nos ESRS e noutros referenciais de sustentabilidade (incluindo estudos específicos do setor), permitindo a sua aplicabilidade prática pelas empresas do setor.

Em síntese, o instrumento de apoio desenvolvido, materializado numa matriz de impactos ambientais e sociais, constitui um contributo metodológico para a aplicação dos ESRS na indústria solar fotovoltaica, sistematizando os impactos ambientais e sociais identificados ao longo da cadeia de valor e podendo servir de base para futuros estudos científicos e de aplicação empírica no contexto do relato de sustentabilidade das empresas do setor

5. Referências bibliográficas

Apeh, O. O., Meyer, E. L., & Overen, O. K. (2022). *Contributions of solar photovoltaic systems to environmental and socioeconomic aspects of national development—A review. Energies, 15*(16), 5963. https://doi.org/10.3390/en15165963

Choudhary, P., & Srivastava, R. K. (2019). *Sustainability perspectives: A review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. Journal of Cleaner Production, 227*, 589–612. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.107

Comissão Europeia. (2023, 31 de julho). *The Commission adopts the European Sustainability Reporting Standards.* https://finance.ec.europa.eu/news/commission-adopts-european-sustainability-reporting-standards-2023-07-31_en

Comissão Europeia. (2026). *Anexos do Regulamento Delegado da Comissão que altera o Regulamento Delegado (UE) 2023/2772 no que respeita à simplificação de determinadas normas de relato de sustentabilidade* (C(2026) 5010 final, Anexos 1 e 2). https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:65962a57-76c9-11f1-bf5e-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_2&format=PDF

De Giovanni, P. (2025). *Why nobody measures the Scope 4 (avoided) emissions? Let's get it started!. Sustainability, 17*(18), 8317. https://doi.org/10.3390/su17188317

Dubey, S., Jadhav, N. Y., & Zakirova, B. (2013). *Socio-economic and environmental impacts of silicon based photovoltaic (PV) technologies. Energy Procedia, 33*, 322–334. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073

Eccles, R. G., Krzus, M. P., Rogers, J., & Serafeim, G. (2012). *The need for sector-specific materiality and sustainability reporting standards. Journal of Applied Corporate Finance, 24*(2), 65–71. https://doi.org/10.1111/j.1745-6622.2012.00380.x

Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). *Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(5), 1082–1088. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008

Fleacă, B., Fleacă, E., & Corocăescu, M. (2023). *Sustainability information – analysis of current trends in sustainability monitoring & reporting. Entrepreneurship and Sustainability Issues, 10*(3), 274–287. https://doi.org/10.9770/jesi.2023.10.3(18)

Frischknecht, R., Stolz, P., Krebs, L., de Wild-Scholten, M., & Sinha, P. (2020). *Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems* (IEA PVPS Task 12, Report T12-19:2020). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf

Gervais, E., Herceg, S., Nold, S., & Weiß, K.-A. (2021). *Sustainability strategies for PV: Framework, status and needs. EPJ Photovoltaics, 12*, 5. https://doi.org/10.1051/epjpv/2021005

IFRS Foundation. (2023). *IFRS S2 industry-based guidance on implementing climate-related disclosures: Volume 44—Solar technology & project developers*. https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/publications/pdf-standards-issb/english/2023/issued/part-b/ifrs-s2-ibg-volume-44-solar-technology-and-project-developers-part-b.pdf

International Energy Agency. (2024). *Renewables 2023*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

International Renewable Energy Agency. (2024). *Solar PV supply chains: Technical and ESG standards for market integration*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Solar_PV_supply_chains_technical_ESG_standards_2024.pdf

International Renewable Energy Agency, & International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Jan, A. A., Lai, F.-W., Shad, M. K., Ali, S. E. A., & Hamad, S. (2023). *Solar photovoltaic technology and its impact on environmental, social and governance (ESG) performance: A review*. KnE Social Sciences, *8*(20), 759–774. https://doi.org/10.18502/kss.v8i20.14636

Jungcurt, S., Wagner, L., & Rosentreter, H. (2025). *A natural fit: Renewable energy and sustainable land management*. International Institute for Sustainable Development. https://www.iisd.org/system/files/2025-11/renewable-energy-land-management.pdf

Khatami, F., & Goharian, E. (2022). *Beyond profitable shifts to green energies, towards energy sustainability*. *Sustainability, 14*(8), 4506. https://doi.org/10.3390/su14084506

Leal Filho, W., Wall, T., Williams, K., Dinis, M. A. P., Fernandez Martin, R. M., Mazhar, M., & Gatto, A. (2025). *European sustainability reporting standards: An assessment of requirements and preparedness of EU companies*. *Journal of Environmental Management, 380*, 125008. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125008

Li, T., Roskilly, A. P., & Wang, Y. (2017). *A regional life cycle sustainability assessment approach and its application on solar photovoltaic*. *Energy Procedia, 105*, 3320–3325. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.757

Liu, Z., & Wang, G. (2025). *Concept and methodology for Scope 4 carbon accounting*. *Carbonsphere, 1*, 9510002. https://doi.org/10.26599/CS.2025.9510002

Lorenzen, M., & Scher, M. (2020). *More than a megawatt: Embedding social & environmental impact in the renewable energy procurement process*. Salesforce. https://c1.sfdcstatic.com/content/dam/web/en_us/www/assets/pdf/sustainability/sustainability-more-than-megawatt.pdf

Mulvaney, D. (2019). *Solar power: Innovation, sustainability, and environmental justice*. University of California Press.

Muriel, M. J., Larrán, M., Andrades, J., & Calzado, M. Y. (2025). Sustainability information disclosure in the agri-food sector: A systematic literature review. *British Food Journal, 127*(8), 3041–3072. https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2024-0783

Nyffenegger, R., Boukhatmi, Ä., Radavičius, T., & Tvaronavičienė, M. (2024). *How circular is the European photovoltaic industry? Practical insights on current circular economy barriers, enablers, and goals*. *Journal of Cleaner Production, 448*, 141376. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141376

O'Keeffe, M., & Brander, M. (2025). *Mapping the landscape of corporate avoided emissions accounting methodologies*. *Carbon Management, 16*(1), 2504936. https://doi.org/10.1080/17583004.2025.2504936

Onat, N., & Bayar, H. (2010). *The sustainability indicators of power production systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(9), 3108–3115. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.022

Operato, L., Gallo, A., Marino, E. A. E., & Mattioli, D. (2025). *Navigating CSRD reporting: Turning compliance into sustainable development with science-based metrics*. *Environmental Development, 54*, 101138. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101138

Parlamento Europeu, & Conselho da União Europeia. (2022). *Diretiva (UE) 2022/2464 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de dezembro de 2022, que altera o Regulamento (UE) n.º 537/2014, a Diretiva 2004/109/CE, a Diretiva 2006/43/CE e a Diretiva 2013/34/UE no que respeita ao relato de sustentabilidade das empresas*. Jornal Oficial da União Europeia, *L*322, 15–80. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj

Parlamento Europeu, & Conselho da União Europeia. (2026). *Diretiva (UE) 2026/470 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de fevereiro de 2026, que altera as Diretivas 2006/43/CE, 2013/34/UE, (UE) 2022/2464 e (UE) 2024/1760 no que diz respeito a determinados requisitos de relato de sustentabilidade das empresas e determinados requisitos de dever de diligência das empresas em matéria de sustentabilidade*. Jornal Oficial da União Europeia, *L*, 2026/470. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2026/470/oj

Randle-Boggis, R. J., White, P. C. L., Cruz, J., Parker, G., Montag, H., Scurlock, J. M. O., & Armstrong, A. (2020). *Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed, evidence-based approach*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 125*, 109775. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109775

Schnatmann, A. K., Schoden, F., & Schwenzfeier-Hellkamp, E. (2022). *Sustainable PV module design—Review of state-of-the-art encapsulation methods*. *Sustainability, 14*(16), 9971. https://doi.org/10.3390/su14169971

Sinha, P., Heath, G., Wade, A., & Komoto, K. (2020). *Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). https://doi.org/10.2172/2308820

SolarPower Europe. (2021). *Solar sustainability best practices benchmark*. https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/solar-sustainability-best-practices-benchmark

SolarPower Europe. (2024). *Sustainable solar: Environmental, social, and governance actions along the value chain*. https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/sustainable-solar-environmental-social-and-governance-actions-along-the-value-chain

Solar Stewardship Initiative. (2025). *The Solar Stewardship Initiative ESG Standard*. https://www.solarstewardshipinitiative.org/app/uploads/2025/07/ESG-Standard.pdf

Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., & Alkasrawi, M. (2021). *Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future*

outlook. *Science of The Total Environment, 759*, 143528. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528

União Europeia. (2023). *Regulamento Delegado (UE) 2023/2772 da Comissão, de 31 de julho de 2023, que complementa a Diretiva 2013/34/UE do Parlamento Europeu e do Conselho no respeitante às normas de relato de sustentabilidade*. Jornal Oficial da União Europeia, L, 2023/2772. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj

Voráček, S. (2025). *A historical overview of non-financial reporting. Business & IT, 15*(1), 56–73. https://doi.org/10.14311/bit.2025.01.05

Wade, A., Sinha, P., Drozdiak, K., Mulvaney, D., & Slomka, J. (2018). Ecodesign, ecolabeling and green procurement policies—Enabling more sustainable photovoltaics? In *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC): A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC* (pp. 2600–2605). IEEE. https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547210

Wade, A., Sauer, T. C., Neuhaus, H., Probst, L., Taylor, R., Moser, D., Rohr, C., & Rossi, R. (2021). *Eco-design and energy labeling for photovoltaic modules, inverters and systems: Enabling a sustainable value chain in the EU?* In *Proceedings of the 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* (pp. 690–695). https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20212021-4DO.11.1

Wambach, K., Heath, G., & Libby, C. (2017). *Life cycle inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe* (IEA-PVPS T12-12:2017). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/LCI_of_Current_European_PV_Recycling_WambachHeath_2017_by_Task_12.pdf

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. International Renewable Energy Agency. https://doi.org/10.2172/1561525

World Business Council for Sustainable Development. (2023). *Guidance on avoided emissions: Helping businesses drive innovations and scale solutions toward net zero*. https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Avoided-Emissions-guidance_WBCSD.pdf

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future* (UN Doc. A/42/427). United Nations. https://digitallibrary.un.org/record/139811

Young-Ferris, A., Malik, A., Calderbank, V., & Jacob-John, J. (2025). *Making things (that don't exist) count: A study of Scope 4 emissions accounting claims*. *Accounting, Auditing & Accountability Journal, 38*(1), 60–89. https://doi.org/10.1108/AAAJ-04-2023-6406

Zafrilla, J. E., Arce, G., Cadarso, M. Á., Córcoles, C., Gómez, N., López, L. A., Monsalve, F., & Tobarra, M. Á. (2019). *Triple bottom line analysis of the Spanish solar photovoltaic sector: A footprint assessment*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114*, 109311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109311

Anexo — Matriz de impactos ambientais e sociais da indústria solar fotovoltaica

Tópico ESRS	Subtópico ESRS	Impacto (Descrição Específica)	Tipo de Impacto	Fase da Cadeia de Valor	Artigo/Documento	Tipo de Fonte
ESRS E1	Mitigação das alterações climáticas	Emissões de gases com efeito de estufa	Negativo	Montante (Extração/Fabrico)	Evans et al. (2009) Li et al. (2017) SolarPower Europe (2021)	Científica e Setorial
ESRS E1	Energia	Consumo energético e intensidade energética	Negativo	Montante (Fabrico)	IFRS Foundation (2023)	Standard
ESRS E1	Mitigação das alterações climáticas	Redução da dependência de combustíveis fósseis	Positivo	Uso (Operação)	SolarPower Europe (2024)	Setorial
ESRS E2	Poluição do ar	Benefícios climáticos por redução de poluentes (qualidade do ar)	Positivo	Uso (Operação)	Zafrilla et al. (2019)	Científica
ESRS E3	Consumo de água / Captação de água / Descarga de água	Consumo de água	Negativo	Montante (Fabrico)	Khatami & Goharian (2022) Evans et al. (2009) Tawalbeh et al. (2021)	Científica
ESRS E4	Estado das espécies	Impactos sobre vida selvagem -morte e alterações nas espécies	Negativo	Toda a cadeia de valor	Lorenzen & Scher (2020)	Científica
ESRS E4	Biodiversidade	Aumento da Biodiversidade e vida Selvagem	Positivo	Uso (Operação)	SolarPower Europe (2021) SolarPower Europe (2024) Lorenzen & Scher (2020)	Setorial
ESRS E4	Uso dos solos	Potencial regeneração ecológica e melhoria da gestão do solo	Positivo	Toda a cadeia de valor	Jungcurt et al. (2025)	Científica
ESRS E4	Serviços de ecossistema	Benefícios em termos de capital natural e serviços de ecossistema	Positivo	Uso (Operação)	Randle-Boggis et al. (2020)	Científica

Tópico ESRS	Sub-Tópico ESRS	Impacto (Descrição Específica)	Tipo de Impacto	Fase da Cadeia de Valor	Artigo/Documento	Tipo de Fonte
ESRS E4	Uso dos solos	Aumento significativo da intensidade do uso dos solos	Negativo	Toda a cadeia de valor	Jungcurt et al. (2025)	Científica
ESRS E4	Serviços de ecossistema	Resiliência climática agrícola via Agrofotovoltaica	Positivo	Uso (Operação)	SolarPower Europe (2024) SolarPower Europe (2021)	Setorial
ESRS E5	Saída de recursos (produtos e serviços)	Perda de materiais críticos (silício, prata, alumínio) devido a reciclagem ineficiente.	Negativo	Montante (Extração)	IRENA & IEA-PVPS (2016)	Setorial
ESRS E5	Saída de recursos (resíduos)	Geração e acumulação de resíduos de módulos fotovoltaicos no fim de vida	Negativo	Jusante	Weckend et al. (2016)	Setorial
ESRS E5	Saída de recursos (produtos e serviços)	Limitações na capacidade e infraestrutura de reciclagem	Negativo	Jusante	Schnatmann et al. (2022)	Científica
ESRS E5	Saída de recursos (produtos e serviços)	Reutilização de materiais de módulos fotovoltaicos	Positivo	Jusante	Wambach et al. (2017)	Científica
ESRS S1/S2	Condições de trabalho	Igualdade de tratamento e oportunidade para todos	Positivo	Toda a cadeia de valor	SolarPower Europe (2024)	Setorial
ESRS S1/S2	Condições de trabalho	Direitos humanos e condições de trabalho dignas na cadeia de valor	Negativo	Toda a cadeia de valor	SolarPower Europe (2021)	Setorial
ESRS S1/S2	Condições de trabalho	Exposição a substâncias perigosas no fabrico, instalação ou operação de painéis solares fotovoltaicos	Negativo	Toda a cadeia de valor	Dubey et al. (2013); Jan et al. (2023); Sinha et al. (2020)	Científica

Tópico ESRS	Sub-Tópico ESRS	Impacto (Descrição Específica)	Tipo de Impacto	Fase da Cadeia de Valor	Artigo/Documento	Tipo de Fonte
ESRS S1/S2	Condições de trabalho	Existência de más condições laborais em fábricas	Negativo	Montante (Fabrico)	Mulvaney (2019)	Científica
ESRS S1/S2	Condições de trabalho	Criação significativa de emprego no setor solar	Positivo	Toda a cadeia de valor	Apeh et al. (2022)	Científica
ESRS S3	Direitos económicos e sociais	Impactos socioeconómicos locais (emprego, rendimento, desenvolvimento)	Positivo	Toda a cadeia de valor	SolarPower Europe (2024) Jungcurt et al. (2025)	Científica e Setorial
ESRS S3	Impactos relacionados com a terra	Melhoria do acesso à energia e substituição de fontes tradicionais poluentes	Positivo	Uso (Operação)	Jungcurt et al. (2025)	Científica
ESRS S3	Direitos Civis e Políticos das comunidades	Reforço da coesão social e criação de valor partilhado através do envolvimento comunitário eficaz	Positivo	Uso (Desenvolvimento)	Lorenzen & Scher (2020)	Científica
ESRS S3	Impactos relacionados com a terra	Aumento da eficiência e sustentabilidade dos sistemas agrícolas e alimentares	Positivo	Uso (Operação)	Jungcurt et al. (2025)	Científica
ESRS S3	Saúde e segurança das comunidades afetadas	Melhoria da saúde pública associada à redução de poluentes	Positivo	Uso (Operação)	Lorenzen & Scher (2020)	Científica
ESRS S3	Impactos relacionados com a terra	Conflitos de uso do solo e oposição social local ao desenvolvimento de projetos solares fotovoltaicos	Negativo	Uso (Desenvolvimento e Construção)	SolarPower Europe (2021)	Setorial

Tópico ESRS	Sub-Tópico ESRS	Impacto (Descrição Específica)	Tipo de Impacto	Fase da Cadeia de Valor	Artigo/Documento	Tipo de Fonte
ESRS S3	Impactos relacionados com a terra	Violação de direitos humanos associado a uso inadequado do solo e recursos hídricos	Negativo	Uso (Construção e Operação)	IRENA (2024)	Setorial
ESRS S3	Direitos civis e políticos das comunidades	Conflitos sociais decorrentes da inadequada consideração das preocupações das comunidades locais	Negativo	Uso (Desenvolvimento e Licenciamento)	SolarPower Europe (2021) Lorenzen & Scher (2020)	Científica e Setorial

FEP FACULDADE DE **ECONOMIA E GESTÃO**