



Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos: Uma comparação entre as tecnologias monocristalino e filme fino de CdTe.

Life cycle sustainability assessment of solar photovoltaic modules: A comparison between monocrystalline and CdTe thin-film technologies.

DOI: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v1i1.933>

João Gabriel Lassio - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro <https://orcid.org/0000-0002-7072-6769>

David Castelo Branco - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro <https://orcid.org/0000-0002-9053-7033>

Alessandra Magrini - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro <https://orcid.org/0000-0002-3006-6743>

RESUMO: Sob o ponto de vista da sustentabilidade, a atual transição energética rumo as fontes renováveis de energia deve atender, além dos predominantes critérios econômicos, critérios de relevância social e prudência ecológica. Dentro deste contexto, o presente artigo avalia a sustentabilidade do ciclo de vida de duas tecnologias solar fotovoltaica. Para isto, emprega a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) com o intuito de comparar os desempenhos ambiental, social e econômico de módulos fotovoltaicos monocristalino (mono-Si) e de filme fino de telureto de cádmio (CdTe), segundo um total de seis critérios, sendo um par atribuído a cada dimensão da sustentabilidade: qualidade do ecossistema, aquecimento global, longevidade e saúde humana, equidade intergeracional, período de retorno do investimento e custo nivelado de energia. Nesta análise, foram consideradas as etapas de extração e processamento de matérias-primas, produção de materiais, montagem dos módulos fotovoltaicos, atividades de transportes necessárias à importação, operação e fim de vida dos módulos fotovoltaicos. Segundo os resultados obtidos, a tecnologia de filme fino de CdTe se revelou como a opção de melhor desempenho em termos de sustentabilidade, sendo destaque nas dimensões ambiental e social. Por outro lado, a opção de mono-Si obteve um desempenho superior entre os critérios econômicos.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Avaliação do Ciclo de Vida, Energia solar, Módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT: In the context of sustainable development, the current worldwide energy transition from fossil fuels to renewable sources of energy needs to meet, besides economic criteria, environmental and social criteria. Against this background, the present paper assesses the sustainability of solar photovoltaic technologies along their life cycle. With this aim in mind, it carries out a Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) in order to compare the environmental, social, and economic performance of monocrystalline (mono-Si) and cadmium-telluride (CdTe) thin-film modules against six sustainability criteria: ecosystem quality, global warming, human longevity and health, intergenerational equity, payback period, Levelized Cost of Energy (LCOE). In this analysis, the system boundaries encompass the extraction and processing of the raw materials, the production of components of the solar photovoltaic modules, transport activities required for their importation, and the operation and the end of life of the solar photovoltaic modules. According to our results, the CdTe thin-film technology proved to be the best option for sustainability as it stood out in the environmental and social dimensions. At the same time, mono-Si technology obtained the best economic performance.

Keywords: Sustainability, Life Cycle Assessment, Solar energy, Photovoltaic modules.

INTRODUÇÃO

O paradigma de sustentabilidade vem estimulando uma transição energética rumo as fontes renováveis e também reivindicando uma abordagem mais equilibrada de questões socioambientais diante do domínio de aspectos econômicos. Em decorrência disto, repensar o modo hegemônico de geração de energia deve compreender critérios de relevância social e prudência ecológica. Dentre as fontes renováveis de energia mais promissoras, a energia solar fotovoltaica é uma das que mais se expandem no mundo (IEA, 2020). No Brasil, o cenário não é muito diferente. Somente no período 2018-2019, a geração elétrica centralizada por meio da energia solar fotovoltaica cresceu mais de 90% (BRASIL, 2020).

Embora seja amplamente vista como uma fonte totalmente limpa, a tecnologia solar fotovoltaica gera impactos e, por isso, requer um tratamento através de ferramentas e indicadores adequados às suas particularidades. O melhor exemplo disto é que a maior parte dos seus impactos não está concentrada na geração de energia, mas distribuída ao longo de sua cadeia produtiva (LAURENT et al., 2018).

Com efeito, o ciclo de vida de módulos fotovoltaicos tem reflexo sobre diversas questões atinentes a sustentabilidade. Para citar apenas um exemplo, alguns de seus componentes são produzidos a partir de metais, tais como as terras raras. Estes recursos minerais requerem processos industriais cujos custos ambiental e econômico são relevantes (PITRON, 2018; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012). Do ponto de vista social, sua extração envolve geralmente condições de trabalho que desrespeitam direitos fundamentais sociais e do trabalho (BORTOLINI, 2020).

Além desses, existem outros aspectos que merecem destaques, tais como a destinação dos módulos fotovoltaicos quando finalizada

a sua vida útil e a necessidade de se importar para o país grande parte de seus dispositivos, o que exige uma logística mais extensa e, portanto, mais onerosa em termos econômicos e ambientais (RAMOS et al., 2018).

Esse quadro evidencia que a cadeia produtiva de módulos fotovoltaicos se revela não só geradora de gases de efeito estufa (GEE), como impactante em relação a outros aspectos. Diante disto, o presente artigo integra uma pesquisa que tem por objetivo avaliar a sustentabilidade do ciclo de vida de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas e renováveis de energia. Para isto, emprega a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) visando comparar os desempenhos ambiental, social e econômico de dois tipos de módulos fotovoltaicos, sendo eles monocristalino (mono-Si) e filme fino de telureto de cádmio (CdTe).

Longe de questionar o papel da fonte solar fotovoltaica na transição energética em curso e o interesse crescente por esta fonte, cabe destacar que o presente trabalho pretende contribuir para a melhoria do desempenho do sistema energético futuro, se antecipando aos seus desafios potenciais e orientando as decisões do setor no sentido da sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

PRINCIPAIS TECNOLOGIAS SOLAR FOTOVOLTAICA

Na tecnologia solar fotovoltaica, a energia da radiação solar é convertida diretamente em eletricidade por meio de células solares constituídas por materiais semicondutores. Atualmente, existe uma variedade de células solares disponíveis no mercado, as quais podem ser divididas em dois grupos principais: células de silício cristalino e filme fino. Cabe mencionar que, tendo em vista o progresso contínuo no que diz respeito a pesquisa e desenvolvimento da energia solar,

novas tecnologias de células solares fotovoltaicas vêm sendo desenvolvidas, dentre as quais merecem destaque as células solares de arseneto de gálio (GaAs), sensibilizadas por corante e de perovskita (PAVLOVIC et al., 2020; RICHHARIYA et al., 2020).

Células de silício cristalino

As células de silício cristalino correspondem ao tipo mais utilizado no mundo graças sobretudo a sua melhor eficiência com relação as demais tecnologias. As células de silício mono-Si e silício multicristalino (multi-Si) são as mais populares (RICHHARIYA et al., 2020; TIWARI et al., 2016). Enquanto as células mono-Si consistem em uma estrutura de cristal homogênea; as células multi-Si são compostas por vários cristais de silício pequenos com diferentes orientações. As células mono-Si requerem processos produtivos mais caros quando comparado com aqueles das células multi-Si (RAMOS et al., 2018; RICHHARIYA et al., 2020). Em contrapartida, possuem uma maior eficiência de conversão de energia, cerca de 17% contra aproximadamente 15% das células multi-Si (PAVLOVIC et al., 2020).

Células de filme fino

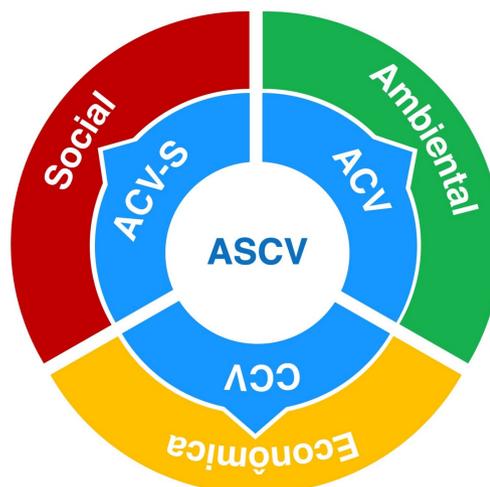
As células fotovoltaicas de filme fino são produzidas depositando uma ou mais camadas extremamente finas de materiais semicondutores em substratos rígidos ou flexíveis, tais como vidro, plástico ou metais, conferindo-lhes uma maior diversidade de aplicações (RAMOS et al., 2018). Quando comparadas com células de silício cristalino, as células de filme fino são geralmente menos eficientes na conversão da luz solar em eletricidade, mas têm potencial para redução de custos devido não só à quantidade reduzida de material semicondutor necessário, mas também ao fato de seus módulos não serem produzidos como células individuais, reduzindo o custo de mão de obra (PAVLOVIC et al., 2020). Alguns dos principais exemplos deste tipo de célula fotovoltaica são

silício amorfo (a-Si), CdTe, seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e células solares orgânicas (RICHHARIYA et al., 2020). Dentre elas as células de CdTe e CIGS são as tecnologias de filme fino mais utilizadas, e seus módulos comerciais têm uma eficiência de cerca de 16% e 17,5%, respectivamente (PAVLOVIC et al., 2020).

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA

A ASCV é resultado da ampliação do escopo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), restrita a temas ambientais, no sentido de cobrir também questões sociais e econômicas. É uma abordagem mais holística e, por isso, se mostra adequada tanto para os atuais imperativos de sustentabilidade quanto para o novo perfil da matriz elétrica nacional. Por um lado, é compatível com o conceito do Triple Bottom Line (TBL) (ELKINGTON, 1998). Por outro, é apropriada às fontes renováveis de energia com forte potencial de desenvolvimento no país uma vez que a maior parte dos seus impactos está distribuída ao longo de suas cadeias produtivas (LAURENT et al., 2018). A abordagem de ASCV fornecida por Klopffer (2008) é a mais empregada pela literatura e requer a aplicação do trio ACV, Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV) (Figura 1).

Figura 1: Ilustração da estrutura da ASCV.



Fonte: Elaboração própria.

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Do ponto de vista ambiental, a ACV cobre os aspectos ambientais desde a aquisição de matérias-primas até a disposição final de resíduos relativos a produtos ou serviços. Possui um roteiro metodológico padronizado pela série de normas ISO 14.040 (ISO, 2006a) e 14.044 (ISO, 2006b), o qual estabelece quatro etapas para sua aplicação, quais sejam: (1) definição de escopo e objetivo, (2) análise de inventário (ICV), (3) avaliação de impactos ambientais (AICV) e (4) interpretação de resultados. Para a condução de estudos de ACV, existe uma gama de softwares que dispõem de bancos de dados de ICV e métodos de cálculos de AICV, os quais subsidiam a análise dos fluxos de materiais e energia e a correlação desses fluxos com aspectos ambientais específicos, respectivamente.

Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S)

Analogamente a ACV, a ACV-S visa avaliar os impactos sociais relacionados ao ciclo de vida de um produto ou serviço (MOLTESEN e BJØRN, 2018). Tal procedimento, ainda incipiente, se distingue de outras metodologias de avaliação de impactos sociais em razão do seu objeto (bens de consumo e serviços) e seu campo de estudo (ciclo de vida completo). O grupo de trabalho composto pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e pela Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) fornece elementos-chave, categorias de impactos e outras orientações específicas para a condução de uma ACV-S (UNEP/SETAC LIFE CYCLE INITIATIVE, 2009). Apesar disso, vale mencionar que a literatura disponível tem relatado desafios relativos, sobretudo, à seleção de indicadores sociais apropriados e viáveis, além de divergências metodológicas (EC-JCR, 2010; TRAVERSO et al., 2012).

Custo do Ciclo de Vida (CCV)

O CCV corresponde ao pilar econômico da ASCV na medida em que permite avaliar o desempenho econômico em função dos custos financeiros incorridos ao longo do ciclo de vida completo de bens de consumo e serviços (HUNKELER et al., 2008). Pode ser utilizado como ferramenta de planejamento e otimização; para identificação de hotspots; e para subsidiar uma análise de viabilidade econômica (RÖDGER et al., 2018). Seu alinhamento com a metodologia da ACV clássica se dá, sobretudo, pela compatibilização das fronteiras do sistema, unidade funcional e etapas metodológicas. Mesmo já sendo utilizado por parte significativa da indústria, o CCV não dispõe ainda de um roteiro padronizado e amplamente reconhecido no âmbito da ASCV. O que mais se aproxima disso é a metodologia oferecida por Hunkeler et al. (2008), a qual é fruto de esforços envidados pela dupla de trabalho UNEP/SETAC (RÖDGER et al., 2018).

METODOLOGIA EMPREGADA NA AVALIAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para avaliar e comparar a sustentabilidade das tecnologias fotovoltaicas de mono-Si e filme fino de CdTe (Tabela 1), o presente artigo lança mão de uma abordagem de ciclo de vida conforme a estrutura e requisitos metodológicos fornecidos pelas normas ISO 14.040 (ISO, 2006a) e 14.044 (ISO, 2006b). Assim, é conduzida uma avaliação dos seus desempenhos ambiental, social e econômico associados a geração de 1 kWh de energia elétrica dentro de um contexto nacional.

Tabela 1: Características principais dos módulos fotovoltaicos.

Características principais	Tecnologia solar fotovoltaica	
	Mono-Si	Filme fino de CdTe
Eficiência ^a	16,4 %	13,7 %
Degradação ^b	0,36 %/ano	0,40 %/ano
Capacidade instalada	1,0 kW	1,0 kW
Área	6,11 m ²	7,89 m ²
Vida útil	25 anos	25 anos

Fontes: ^aSystem Advisor Model (SAM) (BLAIR et al., 2014); ^bJordan e Kurtz (2013).

Durante o período de vida útil de 25 anos, uma manutenção mínima e uma taxa de degradação para cada uma das tecnologias são levados em conta. As informações referentes aos fluxos de entrada e de saída dos processos correspondem a dados secundários provenientes da base de dados Ecoinvent 3.0 (FRISCHKNECHT et al., 2007). Tais informações foram, quando necessário e possível, modificadas de modo a melhor refletir o contexto brasileiro. Os resultados referentes as dimensões ambiental e social foram obtidos junto ao software SimaPro por meio do método IMPACT 2002+ (JOLLIET et al., 2003), enquanto aqueles relativos à dimensão econômica calculados com base na literatura especializada disponível (ver Tabela 2).

Tabela 2: Principais fontes de dados por dimensão da sustentabilidade.

Dimensões da sustentabilidade	Fontes
Ambiental	Ecoinvent database (FRISCHKNECHT et al., 2007); Stolz et al. (2017).
Social	
Econômica	Horowitz et al. (2016); Jordan e Kurtz (2013); Sundaram et al. (2016).

Neste artigo, foi considerado que as células mono-Si são fabricadas na China. Em seguida, processadas e montadas no Brasil para formar um módulo fotovoltaico. Já as células de filme fino de CdTe são produzidas e montadas em módulos fotovoltaicos nos Estados Unidos. Deste modo, o traslado marítimo necessário para a exportação de células e módulos

fotovoltaicos a partir dos seus países de origem até o Brasil também foi considerado.

No seu fim de vida, é fundamental que módulos fotovoltaicos sejam destinados para reciclagem (POORTMANS e

ARKHIPOV, 2006). Deste modo, este artigo considera a reciclagem dos materiais quando do fim de vida dos módulos fotovoltaicos, tais como vidro, cobre, cádmio e telúrio, segundo uma taxa de coleta de 65% e uma taxa de recuperação de material de 90% (MARWEDE e RELLER, 2012; STOLZ et al., 2017). Na avaliação dos módulos fotovoltaicos, não são considerados o *balance of systems* (BOS), a conexão com a rede de distribuição, nem os transportes a nível nacional.

No que diz respeito aos indicadores de sustentabilidade considerados, os módulos fotovoltaicos são avaliados segundo um total de seis indicadores, sendo um par atribuído a cada dimensão da sustentabilidade (Tabela 3). Iniciando pela dimensão ambiental,

destacamos que, embora a ausência de emissões de GEE durante a operação da tecnologia fotovoltaica seja sua característica mais importante (CUCCHIELLA e

D'ADAMO; ROSA, 2015), o lançamento destes gases na atmosfera e outros impactos ambientais ocorrem em outras etapas da sua cadeia de valor. Por exemplo, a extração de recursos naturais e a localização de instalações industriais podem causar danos ao solo e aos ecossistemas. Os poluentes emitidos na produção de módulos

fotovoltaicos podem alcançar o abastecimento de água e cadeias alimentares, afetando diversas formas de vida. Assim, os indicadores ambientais selecionados correspondem aqueles normalmente considerados em estudos de ACV e calculados de acordo com o método IMPACT 2002+ (JOLLIET et al., 2003), são eles:

1) *Qualidade do ecossistema*: leva em consideração os impactos sobre o ambiente natural. É expresso em $\text{PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{y}$ que representa a fração de espécies desaparecidas em 1 m^2 de superfície terrestre dentro de um período de um ano (JOLLIET et al., 2003).

2) *Aquecimento global*: é frequentemente empregado como um indicador relativo às mudanças climáticas em estudos de ACV que tratam da energia solar fotovoltaica (ARDENTE et al., 2015). É expresso em termos de CO_2 equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$).

Com relação a dimensão social, o presente artigo se concentra sobre a saúde coletiva e o acesso à recursos na medida em que os mesmos são essenciais para a garantia do bem-estar humano. Assim, os indicadores sociais selecionados têm como base o método IMPACT 2002+ (JOLLIET et al., 2003) e estão listados a seguir.

1) *Longevidade e saúde humana*: é utilizado o indicador *disability-adjusted life years* (DALY) que é medido em anos e caracteriza a gravidade da doença, levando em consideração tanto a mortalidade quanto a morbidade (JOLLIET et al., 2003).

2) *Equidade intergeracional*: tendo em vista que algumas das questões intergeracionais mais importantes incluem o esgotamento de recursos exauríveis (KAPLAN et al., 2017; SANTOYO-CASTELAZO e AZAPAGIC, 2014), tais questões são tratadas por meio do esgotamento de recursos minerais e energéticos de origem fóssil. É medido em termos da quantidade de energia, em Megajoule (MJ), que é extraída

ou necessária para explorar um recurso (JOLLIET et al., 2003).

Por fim, no que diz respeito aos indicadores econômicos, são levados em conta apenas os custos internos decorridos ao longo do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos sobre o ponto de vista do empreendedor. Sob esta perspectiva, os dois indicadores considerados são:

1) *Período de retorno do investimento*: é tido como um dos principais fatores de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. Representa a rapidez em termos temporais com que o investimento inicial pode ser recuperado (VAN SARK et al., 2017).

2) *Custo nivelado de energia*: é talvez a métrica mais comumente utilizada para análise econômica de sistemas fotovoltaicos. Fornece o custo médio da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do sistema (VAN SARK et al., 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados obtidos, a tecnologia fotovoltaica de filme fino de CdTe apresentou o melhor desempenho ambiental nas duas categorias de impactos consideradas (*Qualidade do ecossistema* e *Aquecimento global*). Para ambas as opções tecnológicas, a etapa de produção foi dominante. No que diz respeito mais especificamente a categoria relativa ao *Aquecimento global*, o módulo fotovoltaico de mono-Si está associado a $40\text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$, enquanto o de filme fino de CdTe a $11\text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$.

Analogamente a dimensão ambiental, a tecnologia fotovoltaica de filme fino de CdTe se revelou como aquela de melhor desempenho social. Cabe mencionar que ao requisitar o emprego de materiais tóxicos (Cd e Te), a opção de filme fino dominou, no entanto, os parâmetros relativos a cancerígenos da categoria de impacto *Longevidade e saúde humana* (ver Tabela 3).

Tabela 3: Relação e detalhamento dos indicadores de sustentabilidade.

Indicadores	Unidade	Parâmetros	Referências ^a
<i>Ambiental</i>			
Qualidade do ecossistema	PDF·m ² ·y	Ecotoxicidade aquática	Li et al. (2018); Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014); Traverso et al. (2012)
		Acidificação/Eutrofização aquática	
		Ecotoxicidade terrestre	
		Acidificação/Eutrofização terrestre	
		Ocupação do solo	
Aquecimento global	kg CO _{2eq.}	Potencial de aquecimento global	Liu et al. (2015); Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014); Traverso et al. (2012)
<i>Econômico</i>			
Período de retorno do investimento	Anos	Tempo necessário para recuperar os custos de investimento dos módulos fotovoltaicos	Li et al. (2018); Smets et al. (2016); Tiwari et al. (2016)
Custo nivelado de energia	R\$	Custo da energia gerada ao longo da vida útil dos módulos fotovoltaicos	Bianchini et al. (2016); Li et al. (2018); Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014)
<i>Social</i>			
Longevidade e saúde humana	DALY	Cancerígenos	Li et al. (2018); Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014); Traverso et al. (2012)
		Não-cancerígenos	
		Respiratórios orgânicos e inorgânicos	
		Radiação ionizante	
		Depleção da camada de ozônio	
Equidade intergeracional	MJ	Uso de energia não renovável	Li et al. (2018); Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014); Traverso et al. (2012)
		Extração de minerais	

Nota: ^aSe refere a estudos que empregaram os respectivos indicadores de sustentabilidade.

Os resultados relativos à categoria de impacto *Equidade intergeracional* vão ao encontro de resultados e relatos da literatura especializada, na qual a opção mono-Si requer, via de regra, duas vezes mais recursos minerais do que o filme fino de CdTe.

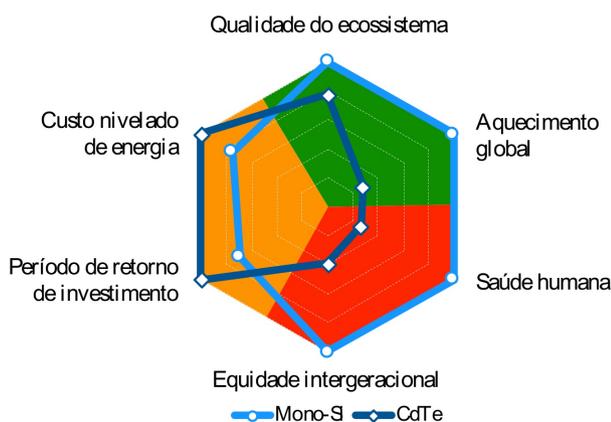
Com relação aos seus desempenhos na dimensão econômica, a tecnologia fotovoltaica de mono-Si não só requer um menor período de geração de energia elétrica para compensar os custos financeiros (em

outras palavras, *Período de retorno de investimento*) como dispõe do menor Custo nivelado de energia quando comparada com a tecnologia de filme fino de CdTe.

Adotando pesos iguais para os indicadores considerados, é possível plotar os desempenhos de ambas as tecnologias sob um formato gráfico de modo a subsidiar a interpretação dos resultados, conforme ilustrado pela Figura 2. Quanto mais próximo das extremidades do gráfico (valor igual 1,0)

pior é o desempenho da tecnologia com relação ao respectivo indicador. Assim, observamos que a opção filme fino de CdTe parece ser aquela relativamente menos impactante, sendo, portanto, mais sustentável quando comparada com o mono-Si.

Figura 2: Ilustração do desempenho dos módulos fotovoltaicos em termos de sustentabilidade.



Fonte: Elaboração própria.

CONCLUSÕES

Considerando que a atual transição energética rumo as fontes renováveis de energia deve atender, além dos predominantes critérios econômicos, critérios de relevância social e prudência ecológica, o presente artigo empregou a ASCV com o intuito de comparar os desempenhos ambiental, social e econômico de dois tipos de módulos fotovoltaicos, mono-Si e filme fino de CdTe. Seus resultados indicaram um melhor desempenho ambiental e social para o filme fino de CdTe, enquanto que o mono-Si se destacou nos critérios econômicos. Vale ressaltar que diferentes considerações entre estudos sobre a geração de energia a partir de tecnologias solar fotovoltaica, tais como diferentes fronteiras de sistemas, podem acarretar variações significativas nos resultados da ASCV.

De um modo geral, apesar de se caracterizar como uma ferramenta incipiente que carece ainda de uma metodologia padronizada e amplamente aceita, a ASCV se mostrou como um recurso valioso para uma análise mais holística e com um elevado

potencial em apoiar a tomada de decisão do setor energético orientada pela sustentabilidade. Cabe ainda ressaltar que o presente ensaio deve ser aprimorado de modo a cobrir outras questões de sustentabilidade, considerar sistemas fotovoltaicos em toda a sua completude, expandir a análise para outras tecnologias fotovoltaicos e aprimorar a etapa de interpretação de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDENTE, Fulvio; CELLURA, Maurizio; LONGO, Sonia; MISTRETTA, Marina. Life Cycle Assessment of Solar Technologies. In: DEWULF, J; MEESTER, S; ALVARENGA, R (eds.). Sustainability Assessment of Renewables-Based Products. West Sussex: John Wiley & Sons, 2015. p. 241-258.

BIANCHINI, Augusto; GAMBUTI, Michele; PELLEGRINI, Marco; SACCANI, Cesare. Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1-11, 2016.

BLAIR, Nate; DOBOS, Aron P; FREEMAN, Janine; NEISES, Ty; WAGNER, Michael; FERGUSON, Tom; GILMAN, Paul; JANZOU, Steven. System advisor model, SAM. NREL Report No. TP-6A20-61019, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, no. February, 2014.

BORTOLINI, Camille. A guerra das terras-raras vai acontecer? – Mineração estratégica no coração do conflito comercial sino-americano. *Le Monde Diplomatique*, n. 157, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://diplomatie.org.br/a-guerra-das-terras-raras-vai-acontecer/>.

BRASIL. Balanço Energético Nacional 2019. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf.

CUCCHIELLA, Federica; D'ADAMO, Idiano; ROSA,

Paolo. End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, p. 18-31, 2015.

EC-JRC. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. EUR 24378 EM. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/euro-scientific-and-technical-research-reports/international-reference-life-cycle-data-system-ilcd-handbook-general-guide-life-cycle>.

ELKINGTON, John. *Cannibals with forks: The triple bottom line of sustainability*. Gabriola Island, BC; Stony Creek, CT: New Society Publishers, 1998.

FRISCHKNECHT, Rolf; JUNGBLUTH, Niels; ALTHAUS, Hans-jörg; DOKA, Gabor; DONES, Roberto; HECK, Thomas; HELLWEG, Stefanie; HISCHE, Roland; NEMECEK, Thomas; REBITZER, Gerald; SPIELMANN, Michael; WERNET, Gregor. Ecoinvent Centre. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. *Ecoinvent: Overview and Methodology*. Ecoinvent Report No. 1, 2007. Disponível em: https://www.ecoinvent.org/files/200712_frischknecht_jungbluth_overview_methodology_ecoinvent2.pdf.

HOROWITZ, Kelsey A.W.; FU, Ran; WOODHOUSE, Michael. An analysis of glass-glass CIGS manufacturing costs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 154, p. 1-10, 2016.

HUNKELER, David; LICHTENVORT, Kerstin; REBITZER, Gerald. *Environmental Life Cycle Costing*. Boca Raton: CRC Press, 2008.

IEA. *World Energy Outlook 2020*. International Energy Agency, 2020.

ISO. ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization, 2006a.

ISO. ISO 14044: Environmental management -

Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, 2006b.

JOLLIET, Olivier; MARGNI, Manuele; CHARLES, Raphaël; HUMBERT, Sébastien; PAYET, Jérôme; REBITZER, Gerald; ROSENBAUM, Ralph. *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 8, n. 6, 324, 2003.

JORDAN, Dirk; KURTZ, Sarah. Photovoltaic degradation rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 1, p. 12-29, 2013.

KAPLAN, Matthew; SANCHEZ, Mariano; HOFFMAN, Jaco. *Intergenerational Strategies for Sustaining Strong Communities*. Cham: Springer International Publishing, 2017.

KLOEPFFER, Walter. Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, n. 2, p. 89-95, 13 Mar. 2008.

LAURENT, Alexis; ESPINOSA, Nieves; HAUSCHILD, Michael Z. LCA of Energy Systems. In: HAUSCHILD, M; ROSENBAUM, R; OLSEN, S (eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 633-668.

LI, Tianqi; ROSKILLY, Anthony Paul; WANG, Yaodong. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. *Applied Energy*, v. 227, p. 465-479, Oct. 2018.

LIU, Xiaowei; KENT HOEKMAN, S.; ROBBINS, Curt; ROSS, Peter. Lifecycle climate impacts and economic performance of commercial-scale solar PV systems: A study of PV systems at Nevada's Desert Research Institute (DRI). *Solar Energy*, v. 119, p. 561-572, 2015.

MARWEDE, Max; RELLER, Armin. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 69, p. 35-49, 2012.

MOLTESEN, Andreas; BJØRN, Anders. LCA and

- sustainability. In: HAUSCHILD, M; ROSENBAUM, R; OLSEN, S (eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 43-55.
- PAVLOVIC, Tomislav; TSANKOV, Plamen Ts.; CEKIĆ, Nikola Dj.; RADONJIĆ MITIĆ, Ivana S. Photovoltaic Solar Energy Conversion. In: PAVLOVIC, T (eds.). *The Sun and Photovoltaic Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 45-193.
- PITRON, Guillaume. *La guerre des métaux rares: La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Paris: Les Liens Qui Libèrent, 2018.
- POORTMANS, Jef; ARKHIPOV, Vladimir. *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.
- RAMOS, Camila; RUIZ, Eduardo Tobias Neme Fernandes; BICALHO, Fábio Weikert; BARBOSA, Juliana Moraes; BARROS, Luísa Valentim; RABASSA, Marília Martins Múffalo. *Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE)*, 2018. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/estudo%20energia%20fotovoltaica%20-%20baixa.pdf>.
- RICHHARIYA, Geetam; KUMAR, Anil; SAMSHER. Solar cell technologies. In: GORJIAN, S; SHUKLA, A (eds.). *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. London: Elsevier, 2020. p. 27-50.
- RÖDGER, Jan-Markus; KJÆR, Louise Laumann; PAGOROPOULOS, Aris. Life Cycle Costing: An Introduction. In: HAUSCHILD, H; ROSENBAUM, R; OLSEN, S (eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 373-399.
- SANTOYO-CASTELAZO, Edgar; AZAPAGIC, Adisa. Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, v. 80, p. 119-138, 2014.
- SMETS, Arno HM; JÄGER, Klaus; ISABELLA, Olindo; SWAAIJ, René ACMM van; ZEMAN, Miro. *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. Cambridge: UIT Cambridge, 2016.
- STOLZ, Philippe; FRISCHKNECHT, Rolf; WAMBACH, Karsten; SINHA, Parikhit; HEATH, Garvin. Life cycle assessment of current photovoltaic module recycling. Report IEA-PVPS T12-13:2018. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2017. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf.
- SUNDARAM, Senthilarasu; BENSON, David; MALLICK, Tapas Kumar. *Solar Photovoltaic Technology Production: Potential Environmental Impacts and Implications for Governance*. London: Academic Press, 2016.
- TIWARI, G. N.; TIWARI, Arvind; SHYAM. *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. Singapore: Springer Singapore, 2016.
- TRAVERSO, Marzia; ASDRUBALI, Francesco; FRANCIÀ, Annalisa; FINKBEINER, Matthias. Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 8, p. 1068-1079, 16 Sep. 2012.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. U.S. Department of Energy: Critical materials strategy. 2012. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/piprod/documents/cms_dec_17_full_web.pdf.
- UNEP/SETAC LIFE CYCLE INITIATIVE. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. 2009. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009%20-%20Guidelines%20for%20sLCA%20-%20EN.pdf>.
- VAN SARK, Wilfried; REINDERS, Angèle; VERLINDEN, Pierre; FREUNDLICH, Alexandre. *Photovoltaic Solar Energy From Fundamentals to Applications. Technological Learning in the Energy Sector*, v. 5, 2017.