

---

## 2 TECNOLOGIAS E PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA A ESCOLHA DE UMA PLACA GERADORA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

### **Patrícia Fagundes Góes**

Acadêmica do curso bacharelado em Engenharia Química no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA). Técnica em Química pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA). Pesquisadora do grupo de pesquisa Ecologia Industrial - ECOIN do IFBA, no tema de energia solar fotovoltaica.

E-mail: [patriciafag3@gmail.com](mailto:patriciafag3@gmail.com)

### **Armando Hirohumi Tanimoto**

Doutor em Gestão e Políticas Ambientais pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável / UnB com estágio de pesquisa (doutorado sanduiche - CAPES) na Universidade Autônoma de Barcelona - UAB. Mestre em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo / UFBA. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia / IFBA campus Salvador.

E-mail: [armando.tanimoto@gmail.com](mailto:armando.tanimoto@gmail.com)

## **RESUMO**

A pesquisa por tecnologias envolvidas na geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis vem crescendo nos últimos anos como uma alternativa aos combustíveis fósseis, sobretudo a energia solar fotovoltaica. Entretanto, é preciso avaliar também os impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida das placas solares. Em estudos recentes, tem-se empregado o método da Análise do Ciclo de Vida – ACV como uma forma de se conhecer os impactos dos módulos fotovoltaicos. Esse artigo tem por objetivo elencar as principais tecnologias fotovoltaicas disponíveis comercialmente e em fase de pesquisa, e avaliar quais parâmetros ambientais podem ser usados na escolha de uma placa geradora de energia solar. Trata-se de um estudo de natureza qualitativa, através da pesquisa bibliográfica exploratória em bases de dados vinculados aos periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, onde foram selecionados trabalhos que aplicaram a ACV aos módulos fotovoltaicos das seguintes tecnologias: silício convencional, Perovskitas, PERC, orgânicas e sistemas fotovoltaicos de alta concentração. Ao final foram identificadas as principais categorias de impactos envolvendo os painéis de tecnologias da primeira geração – a base de silício, e comparadas com as tecnologias emergentes, concluindo-se com a dificuldade de comparação de valores absolutos das categorias de impactos devido a não uniformização dos parâmetros chaves quando da realização de uma Análise de Ciclo de Vida, realizado por diferentes pesquisadores, como as etapas dos processos consideradas, vida útil dos painéis, uso de diferentes bases de dados e métodos, entre outros, porém com potencial futuro de desenvolvimento e uniformidade.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica. ACV de painéis solares.

## ABSTRACT

Research involving new technologies from renewable sources electricity generation has been growing in recent years as an alternative to fossils, especially solar photovoltaic energy. However, it is also necessary to assess the environmental impacts generated over the life cycle of solar panels. In recent studies, the Life Cycle Analysis - LCA method has been used as a way of knowing the impacts of photovoltaic modules. This article aims to list the main photovoltaic technologies available commercially and in the research phase, and to evaluate which environmental parameters can be used to choose a solar energy generator panel. This is a qualitative study, through exploratory bibliographic research in databases linked to the journals of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel, where scientific papers were selected that applied LCA to photovoltaic modules of the following technologies: conventional silicon, Perovskites, PERC, organic and high concentration photovoltaic systems. At the end, the main impact categories involving the first generation technology panels were identified - the silicon base, and compared with the emerging technologies. We conclude that there is difficulty in comparing the absolute values of the impact categories due to the non-standardization of the key parameters when performing a Life Cycle Analysis, carried out by different researchers, such as the stages of the processes considered, life time of the panels, use of different databases and methods, among others, but with future potential for development and uniformity.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy. LCA of solar panels

## 2.1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica está associado a diversos problemas ambientais, como impactos diretos na camada de ozônio, poluição atmosférica, agravamento de doenças respiratórias entre outros. De forma indireta, atualmente há quase um consenso científico de que as emissões de gases do efeito estufa são os responsáveis pelas mudanças climáticas, constituindo um problema futuro para a sobrevivência humana e de animais, produção de alimentos e abastecimento de água (BIZERRA *et al.*, 2018, p. 304).

Neste contexto, o estudo das tecnologias envolvidas na geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis vem crescendo nas últimas décadas, tendo como resultado diversas usinas de geração de energia solar e eólica instaladas, bem como a inserção de biocombustíveis na matriz elétrica de países em diversas partes do mundo.

Dentre as fontes renováveis, destaca-se neste trabalho a energia proveniente do Sol, que, por meio do efeito fotovoltaico, transforma energia solar em energia elétrica através de um sistema gerador de energia solar, que engloba os painéis, bem como os componentes adicionais, como inversores, baterias e controladores (LIMA *et al.*, 2020).

Em teoria, o funcionamento de uma usina geradora de energia solar não emite gases poluentes, visto que não necessita da queima de combustíveis fósseis para gerar eletricidade. Entretanto, por meio de Análises de Ciclo de Vida já realizadas por diversos autores, constata-se que a produção dos módulos fotovoltaicos é capaz de gerar impactos ambientais, visto que as etapas produtivas fazem uso de energia elétrica gerada por fontes poluentes.

Este artigo visa apresentar os parâmetros ambientais que podem ser utilizados para escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica tendo como base resultados de Análises de Ciclo de Vida publicados em artigos, dissertações e teses de algumas tecnologias disponíveis no mercado e em pesquisa em escala laboratorial.

Através deste trabalho espera-se contribuir na pesquisa de estudantes de graduação e pesquisadores no tema da energia solar no que refere aos aspectos ambientais que englobam as placas fotovoltaicas, visto que atualmente os trabalhos publicados muitas vezes são específicos para determinados tipos de tecnologias fotovoltaicas. Ademais, deseja-se auxiliar os usuários desse tipo de energia no processo de escolha de placas geradoras de energia solar fotovoltaica com base em critérios ambientais. Para tanto, este artigo será dividido em seções, visando melhor entendimento dos resultados: principais tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica; explicação breve com relação ao método da Análise de Ciclo de Vida e as

categorias de impacto que norteiam a análise; e os resultados de estudos de ACV de placas fotovoltaicas comparando-se os impactos identificados nos trabalhos publicados.

## 2.2 METODOLOGIA

O método utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi a pesquisa bibliográfica, tendo-se realizado um levantamento bibliográfico exploratório e qualitativo sobre o tema em bases de dados acessadas através do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, utilizando como palavra-chave o termo *life cycle analysis of photovoltaic panels*, combinado com as associações referentes às tecnologias de interesse da pesquisa. Após o levantamento nessas bases de dados, foram priorizados artigos publicados entre 2005 e 2020, no idioma inglês e que realizassem estudo de impactos ambientais pelo método da Análise de Ciclo de Vida de painéis fotovoltaicos, considerando desde a etapa de extração da matéria-prima até o gerenciamento de fim de vida de forma comparativa entre os diversos tipos de tecnologias existentes.

Os resultados dos artigos selecionados foram concatenados com o intuito de avaliar diferentes tipos de tecnologias fotovoltaicas e categorias de impactos ambientais abrangidas pelo método ACV, para assim contribuir no processo de escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica, com base nas categorias de impactos ambientais desta ferramenta. Os autores, os títulos dos trabalhos e as características principais dos estudos estão descritos no Quadro 1 (Seção 5).

## 2.3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são unidades básicas de conversão da energia solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Por definição, o fenômeno da geração de um fluxo de elétrons resultante da incidência de feixes de radiação do sol sobre a superfície da placa fotovoltaica é chamado de efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre em materiais semicondutores, essenciais na produção das células fotovoltaicas, que apresentam características condutivas intermediárias entre os metais e ametais e cuja condutividade varia com a temperatura, sendo amplamente utilizados na fabricação de componentes eletrônicos (SAMPAIO *et al.*, 2019).

Há mais de meio século as tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica são pesquisadas e desenvolvidas com o intuito de trazer para o mercado células cada vez mais

eficientes, de custo reduzido e com potencial para se tornarem alternativas viáveis e acessíveis às fontes já existentes. Nos últimos anos, o principal fator impulsionador das pesquisas é a eficiência de conversão, que se refere à quantidade de energia elétrica que uma célula fotovoltaica é capaz de gerar por 1 m<sup>2</sup> em 1 hora de funcionamento em condições de laboratório (LIMA *et al.*, 2020). O aumento da eficiência das células fotovoltaicas é fundamental para diminuição dos custos de fabricação dos módulos, gerando um mercado competitivo.

Atualmente, as tecnologias de energia solar são categorizadas em três gerações, segundo o material das células solares e funcionamento dos módulos fotovoltaicos.

### 2.3.1 Primeira Geração - *wafers* de silício

Foram as primeiras células a terem seu primeiro protótipo na década de 50. As células feitas de silício cristalino correspondem ao tipo mais utilizado nas instalações de placas solares no mundo devido à sua taxa de eficiência de conversão e disponibilidade de matéria-prima, detendo 95% da participação na produção fotovoltaica mundial (IRENA, 2019). As células de primeira geração são classificadas em três tipos principais, dependendo de como os *wafers* são feitos: silício monocristalino, policristalino e fitas de silício. A diferença entre os tipos reside no arranjo cristalino na célula de silício. O monocristalino é formado por um cristal único e uniforme, enquanto o policristalino é produzido a partir de cristais multifacetados, com superfícies de separação entre os cristais. Estas diferenças derivam-se do processo de fabricação dos *wafers*, que após os processos de dopagem, polimento e acoplamento de condutores dão origem às células. As células monocristalinas possuem aparência homogênea, enquanto as policristalinas são menos uniformes e exibem um aglomerado de cristais multidirecionais (SIMIONI, 2017). De forma geral, o custo da tecnologia de módulo convencional de silício caiu 14% entre dezembro de 2018 e dezembro de 2019, atingindo US \$ 0,27/W (IRENA, 2019).

#### 2.3.1.1 Células de silício monocristalino

O silício monocristalino geralmente é fabricado pelo processo *Czochralski*, cujo produto final é cortado em lâminas de 0,3 mm de espessura aproximadamente, com as quais se produzem as células fotovoltaicas. Esse processo se baseia no crescimento do cristal a partir do silício policristalino fundido a 1500°C, no qual é adicionado, por meio de uma haste, uma semente de silício monocristalino. Nesta semente estão presentes todas as características que o *lingote* apresentará após o processo de cristalização, obtendo a mesma orientação cristalográfica

da semente (SAMPAIO *et al.*, 2019). Outro processo produtivo utilizado na indústria de fabricação das células de silício monocristalino é o de *Float-Zone*. De forma geral, este processo consiste em fundir uma região de uma barra de silício policristalino por aquecimento indutivo e deslocar, lentamente, o foco de calor ao longo da barra que se movimenta em rotação e translação, no qual um cristal de semente é usado em uma extremidade, a fim de iniciar o crescimento do silício monocristalino (SAMPAIO *et al.*, 2019).

Essas células apresentam altos custos de fabricação, maior tempo de retorno de energia, requerem uso de materiais muito puros (silício de grau solar) e demandam maior quantidade de energia durante sua fabricação devido ao seu processo produtivo, com relação aos outros tipos de células. Esta tecnologia apresenta uma eficiência máxima de 23%, tempo de vida útil de 25 a 30 anos (IRENA, 2012) e, segundo o site HomeAdvisor (2020), tem um custo máximo do sistema (incluindo acessórios operacionais como inversores, conectores, fiação entre outros) de **US \$ 1 a US \$ 1,50 por Watt**.

### 2.3.1.2 Células de silício policristalino

Para a produção do silício policristalino, a quantidade de material utilizado é praticamente a mesma utilizada na produção do mono-Si, porém, a energia necessária para produzi-las é significativamente reduzida (NIEDZIALKOSKI, 2013). No Processo de Solidificação Direcional Controlada, procura-se obter o maior tamanho possível dos seus cristais, com uma orientação cristalográfica variada através da fusão seguida do resfriamento lento em moldes apropriados. Neste processo, há grande suscetibilidade à formação de defeitos durante a solidificação que comprometem seu desempenho, tornando-o ligeiramente menor do que nas células monocristalinas (SAMPAIO *et al.*, 2019). Essas células apresentam, com relação ao silício monocristalino: menor custo de fabricação; menor tempo de retorno de energia; demanda menos energia e apresentam uma eficiência máxima de 16% e um tempo de vida útil de 25 a 30 anos (IRENA, 2012). Segundo o site HomeAdvisor (2020) esta tecnologia tem um custo máximo por sistema de **US \$ 0,90 a US \$ 1 por Watt**.

Com o intuito de se reduzir custos, surgem as células de fitas de silício como uma alternativa por meio de técnicas de cristalização do silício policristalino em folhas, fitas ou filmes, o que reduz os desperdícios de matéria-prima ocasionados na etapa do corte dos *lingotes*. De forma reduzida, os processos se referem ao crescimento e cristalização das fitas de silício policristalino em formas planejadas. São células que apresentam eficiência próxima às do silício

policristalino, mas exige menor quantidade de energia durante o processo produtivo (SAMPAIO *et al.*, 2019).

### 2.3.2 Segunda Geração - Filmes Finos

São as tecnologias produzidas a partir da pulverização de semicondutores diversos sobre películas finas em superfícies como vidro, metal ou polímeros (IRENA, 2012). Categoriza-se frequentemente essas células em dois grupos principais: células a base de silício (amorfo ou micromorfo); e as células que não contém silício como semicondutor principal (Perovskitas, CdTe, CIGS, CIS). Por necessitarem de menos material (até 99% menos que as células de silício cristalino), seus custos de fabricação são reduzidos, bem como os impactos ambientais causados (SIMIONI, 2017). Essas células representam atualmente apenas 5% do mercado global de módulos fotovoltaicos solares pois, apesar de terem custo reduzido (se comparado as tecnologias de primeira geração), as células de filmes finos têm historicamente, eficiências mais baixas (IRENA, 2019). Por outro lado, há algumas vantagens nos filmes finos, que os tornam promissores para uma maior participação no mercado dessas tecnologias, dentre elas: menor perda de eficiência com a operação em condições diferentes das nominais, possibilidade de aplicação em superfícies não planas, como telhados e tetos de carros, tendo em vista sua flexibilidade e baixo peso (SIMIONI, 2017). Em geral, os filmes finos têm um tempo de vida útil de 10 a 15 anos. Essas tecnologias apresentam em média um custo de **US \$ 0,70 a US \$ 1 por Watt pelo sistema (com acessórios) instalado, de acordo com o site HomeAdvisor (2020).**

#### 2.3.2.1 Células de filmes finos de silício amorfo

Essas tecnologias são fabricadas com silício que contém alto grau de desordem na estrutura atômica, no qual são utilizados filmes finos de silício amorfo depositados sobre substratos. A aleatoriedade de arranjo dos átomos faz com que esse material apresente um *bandgap* (*gap* de energia) maior que o silício cristalino. O *bandgap* se refere a energia necessária para que o elétron efetue a transição da banda de valência para a banda de condução (ZEGHBROECK, 2006). Quanto maior o *gap* de energia, menor a condutividade, o que afeta também a absorbância do espectro solar, e conseqüentemente, a eficiência. Além disso, o silício amorfo está propenso à degradação mais intensa que a observada para os materiais cristalinos (SIMIONI, 2017).

No processo de fabricação do silício amorfo não existe etapa de corte, o que facilita a confecção, obtendo-se fitas semelhantes às fitas de silício policristalino. Essas células são também utilizadas para manufatura de películas finas de múltiplas junções, que consiste em uma célula de silício amorfo com camadas adicionais de silício amorfo e microcristalino aplicadas sobre o substrato, o que promove um aumento da eficiência de até 10%, tendo em vista que o silício microcristalino absorve mais luz da parte vermelha e infravermelha próxima do espectro de luz (IRENA, 2012). As células de silício amorfo têm vasta aplicação em dispositivos eletrônicos de baixa complexidade, como calculadoras, brinquedos e relógios (LIMA *et al.*, 2020). Segundo IRENA (2012), as células de silício amorfo alcançaram uma eficiência entre 7,1 e 10% e custo máximo do módulo fotovoltaico próximo a 0,8 US\$/W.

#### 2.3.2.2 Células de filmes finos de telureto de cádmio - CdTe

Células de filmes finos de CdTe são caracterizadas por boa absorção e baixas perdas de energia. Atualmente, essa tecnologia possui a maior participação de mercado de todas as tecnologias de filmes finos, além de apresentarem custo reduzido e eficiências razoáveis (IRENA, 2019). As células solares CdTe são feitas por meio de processos de baixa temperatura, o que torna sua produção muito flexível e acessível, por demandar menor quantidade de energia.

As principais matérias-primas da produção das células de CdTe são o cádmio e o telúrio. O cádmio é um subproduto da mineração de zinco e o telúrio é um subproduto do processamento do cobre. Um problema potencial é que o telúrio é produzido em quantidades muito menores do que o cádmio e a disponibilidade a longo prazo pode depender de a indústria do cobre poder otimizar os rendimentos de extração, refino e reciclagem, sendo algo que se reflete na categoria de impacto da depleção abiótica fóssil. O cádmio também apresenta problemas de toxicidade que podem limitar seu uso, apesar de a quantidade usada na confecção das células ser bem pequena. Conforme dados fornecidos pela IRENA (2012), as células de CdTe alcançaram eficiência máxima de 11,6%, e custo máximo do módulo fotovoltaico próximos a 0,9 US\$/W.

#### 2.3.2.3 Células de filmes finos de cobre-índio-seleneto - CIS e *disseleneto de cobre, índio e gálio* - CIGS

As células fotovoltaicas de cobre-índio-seleneto e *disseleneto de cobre, índio e gálio* apresentam as mais altas eficiências de todas as tecnologias fotovoltaicas de filme fino. Em



ambas tecnologias, o semicondutor é formado por películas finas associadas em múltiplas camadas com diferentes *bandgaps*, dispersas sobre um substrato e posteriormente revestidas (SIMIONI, 2017).

A produção de células solares CIS foi comercializada com sucesso por muitas empresas em conjunto com universidades. No entanto, a fabricação de células CIGS pode ser difícil devido à raridade do índio, bem como à estequiometria complexa e múltiplas fases para produzi-las, restringindo a produção em larga escala no curto prazo (IRENA, 2019). Essas tecnologias atingiram a eficiência máxima de 12,1%, e custo máximo do módulo fotovoltaico de aproximadamente 0,9 US\$/W (IRENA, 2012).

#### 2.3.2.4 Células Orgânicas

São células compostas por materiais orgânicos e poliméricos, que apresentam muitas vantagens como: baixo custo de fabricação, flexibilidade, baixo peso, utiliza materiais abundantes, atóxicos e se baseia em um processo de produção bastante reprodutível e com alta produtividade de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente. Essas qualidades permitem que a tecnologia tenha ampla aplicação, como em dispositivos móveis (carregadores de bateria de celulares, relógios, rádios, lanternas, *laptops*), por serem extremamente flexíveis, é possível dobrá-los, enrolá-los e até guardá-los após o uso (IRENA, 2012). Além disso, podem ser utilizados em fachadas de prédios e coberturas de vidro por serem semitransparentes e apresentarem amplas possibilidades de customização. Entretanto, as principais desvantagens estão na baixa eficiência e baixo tempo de vida (cerca de 7 anos) devido a instabilidade. Essa tecnologia conseguiu alcançar 11,1% de eficiência máxima em condições de laboratórios e custo esperado para 2020 de US\$ 0,50/W (IRENA, 2012).

#### 2.3.3 Terceira Geração - Tecnologias Emergentes

Nesta categoria, estão listadas as principais tecnologias que ainda estão em fase de desenvolvimento e utilizam métodos de acoplamento, processos de fabricação e materiais diferentes dos já consolidados, sendo muito comum apresentarem ainda baixas eficiências quando comparadas às outras tecnologias já consolidadas (SIMIONI, 2017). Algumas das mais promissoras são: as células de perovskitas, um tipo de material com capacidade de alta absorção

da luz; as células sensibilizadas por corantes; células de nanocristais e células de múltiplas junções.

### 2.3.3.1 Células de Perovskita

As perovskitas englobam um grande grupo de compostos com fórmula geral  $ABC_3$ , em que A e B são cátions e C é um ânion, o qual geralmente é o íon óxido  $O^{2-}$ , ou íons haleto ( $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $F^-$ ) (RAPHAEL *et al.*, 2018). As primeiras células de perovskitas apresentavam somente 3,8% de eficiência em 2009. No entanto, como os cristais de perovskitas são facilmente obtidos, já em 2018 a tecnologia atingiu 24,2% de conversão da luz solar em eletricidade, fazendo desta uma célula extremamente promissora deste ponto de vista (IRENA, 2019). Apesar das vantagens de fácil obtenção e baixo custo, além das crescentes eficiências atingidas em laboratório, há ainda obstáculos para essa tecnologia superar as células convencionais e adquirir espaço no mercado da energia solar fotovoltaica como a sua durabilidade, uma vez que os cristais, podem se dissolver rapidamente, fazendo com que essas células não sejam adequadas para condições adversas de trabalho (RAPHAEL *et al.*, 2018).

### 2.3.3.2 Células sensibilizadas por corantes

As células sensibilizadas por corantes - DSSC são as únicas que imitam o processo da fotossíntese natural e se baseiam em estruturas de nanocristais semicondutores formadas entre um ânodo fotossensibilizado e um eletrólito. Os nanocristais captam a luz solar e as moléculas do corante atuam na separação das cargas para geração da fotocorrente. Apesar de ser uma tecnologia promissora do ponto de vista da acessibilidade dos materiais e baixo custo de produção, as células DSSC podem se degradar facilmente com a luz solar e a possibilidade de congelamento do eletrólito líquido usado dificulta a aplicação em locais com temperatura mais baixas. Além disso, é difícil encontrar corantes que sejam sensíveis a uma faixa muito ampla espectral (IRENA, 2012). A eficiência máxima obtida em laboratório foi de 11,1%, no entanto, as eficiências comerciais geralmente são abaixo de 5% (IRENA, 2012).

### 2.3.3.3 Células PERC

As células de Emissor Passivado na Célula Traseira são, em essência, células de silício monocristalino ou policristalino nas quais são adicionadas uma camada de passivação na parte

posterior das células, capaz de aumentar sua eficiência em cerca de 0,8% a 1% para mono-Si e de 0,4% a 0,8% para poli-Si, por meio da redução da taxa de recombinação dos elétrons, maior absorção da luz e maior refletividade interna (IRENA, 2019). Esse ganho de eficiência promove, ainda, outras vantagens secundárias: necessidade de menos módulos e consequentemente, menor área, menor número de estruturas de fixação e cabos, entre outros. Além disso, módulos de tecnologia PERC apresentam melhor desempenho em altas temperaturas e em condições de baixa incidência de luz. Entretanto, uma desvantagem desse tipo de célula está na degradação do módulo em suas primeiras horas de exposição à luz solar (TAKATA, 2019).

### 2.3.4 Tecnologias de módulo avançadas

Nas últimas décadas diversas empresas se empenharam na “corrida” para a obtenção de células mais eficientes. Tecnologias como a fotovoltaica concentrada, as células solares bifaciais, as *half-cells* e *multi-busbars* vem ganhando espaço na área de pesquisa e desenvolvimento por se mostrarem compatíveis com as células já existentes e outras inovações emergentes (IRENA, 2019).

#### 2.3.4.1 Tecnologia fotovoltaica concentrada

Os sistemas de concentração fotovoltaicos - CPV dispõem de dispositivos ópticos, como espelhos e lentes que ficam orientados permanentemente em direção ao sol, para concentrar a radiação solar direta em células solares de multijunção e de silício cristalino de alta eficiência (SANTOS *et al.*, 2018). As células solares com múltiplas junções consistem em uma pilha de camadas, cada uma feita de um conjunto de semicondutores (como Ge, GaAs e InGaAs), com *gap* diferente e absorção espectral para absorver o máximo de energia solar espectro possível. Sistemas CPV baseados em células solares de multijunção usando semicondutores de elementos dos grupo III a V da tabela periódica alcançaram eficiência de laboratório de mais de 40% (IRENA, 2012).

A vantagem desta tecnologia está em usar células com alta eficiência e de custo elevado, para obter módulos que necessitem de uma área menor de células; além disso, a menor influência da temperatura e seu baixo tempo de retorno de energia são fatores que contribuem para sua implementação. Dentre as desvantagens, há a necessidade de utilização de um sistema de rastreamento solar e de limpeza frequente dos dispositivos ópticos (SANTOS *et al.*, 2018).

#### 2.3.4.2 Módulos solares bifaciais

Os módulos bifaciais são compostos por células fotovoltaicas que captam energia a partir dos dois lados, permitindo que a energia seja gerada a partir da parte frontal e traseira dos módulos. Quando instalados em superfícies altamente reflexivas, módulos bifaciais podem ter ganho de geração de até 30%, segundo alguns fabricantes. Apesar de serem tecnologias avançadas e emergentes, já estão disponíveis no mercado módulos de diferentes tipos: com e sem moldura, mono e poli cristalinos, tecnologias PERC e/ou *half-cell*, vidro-vidro ou com *backsheet* transporte (TAKATA, 2019).

#### 2.3.4.3 *Half-cells*

Nos módulos *half-cells*, as células são cortadas pela metade por máquinas a laser altamente especializadas, de forma que a conexão interna dos painéis seja diferente, trazendo algumas vantagens, como menor perda por sombreamento que um módulo convencional, melhoria no desempenho e durabilidade (TAKATA, 2019). Essa tecnologia alcançou eficiências de até 18% e classificações de potência de até 300 W, sendo esperado que essa tecnologia atinja até 10% de participação no mercado num futuro próximo (IRENA, 2019).

#### 2.3.4.4 *Solar shingles*

*Solar shingles* ou telhas solares são painéis solares de silício cristalino ou de filmes finos, projetados para se parecerem com materiais convencionais de coberturas. Embora muitas empresas estejam apresentando protótipos de telhas solares, acredita-se que essa tecnologia ainda não tem maturidade para entrar no mercado, visto que as técnicas e o maquinário não estão otimizados completamente (IRENA, 2019). Um exemplo disso é a telha já fabricada no Brasil a partir de 2020 pela Eternit para clientes especiais, e ainda não disponível no mercado.

### 2.3.5 Relação entre custo e tempo de vida dos painéis solares

Importante observar que os custos mencionados estão em termos de US\$/W de potência instalada ou US\$/m<sup>2</sup> do painel, mas na avaliação comercial o tempo de vida das novas tecnologias é mais curto que o dos painéis solares da primeira geração, que de forma genérica pode ser considerada entre 25 e 30 anos, enquanto que os de segunda e terceira gerações, esse

tempo ainda é uma incógnita devido a vários fatores ainda não consolidados. Tsang (2016) estimou o tempo de vida das OPV em 5 anos, IRENA (2012) em 7 anos, e Valverde *et al.* (2010) estimou o tempo de vida das células multijunções orgânicas em 15 anos, na produção em escala de laboratório.

Portanto, apesar do custo das células ser mais baixo para as tecnologias de filmes finos e orgânicas, as células de primeira geração apresentam maior tempo de vida, o que justifica o fato de as tecnologias de silício cristalino deterem atualmente 95% da produção mundial de células fotovoltaicas: o fator econômico a longo prazo.

## 2.4 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA - ACV

A Análise de Ciclo de Vida é uma ferramenta da ecologia industrial usada sobretudo na área de gestão ambiental para mapear os impactos ambientais de determinado processo ou produto, considerando-se desde a extração da matéria-prima, processo produtivo, distribuição até o consumo, uso e disposição final, contemplando também a reciclagem, reuso ou manutenção, ou seja, abrange todo o ciclo de vida do processo ou produto (RODRIGUES, 2015). Para isso, os fluxos de entrada e saída de matéria e energia são medidos de forma quantitativa e diversas categorias de impacto são estabelecidas para facilitar a comparação de diferentes situações, além de considerar também os equipamentos periféricos (*Balance of System* - BOS) que compõe uma usina solar, tais como o inversor, fiação, conexões, suportes e eventualmente um sistema de baterias para os casos de usinas *off grid* (desconectadas da rede).

As categorias de impacto a serem consideradas dentro de um estudo de ACV devem estar alinhadas com os objetivos e escopo da avaliação de determinado processo ou produto. Dentre as categorias mais utilizadas, pode-se citar o aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção abiótica fóssil, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana e ecotoxicidade. Entretanto, neste artigo serão abordadas as categorias que foram quantificadas nas referências utilizadas nos estudos de ACV, com relação às pesquisas envolvendo módulos solares fotovoltaicos. As categorias de impacto tradicionais e mais comumente estudadas em ACV são descritas por Mendes *et al.* (2013) como sendo:

- a) Aquecimento global: se refere ao fenômeno de aumento da temperatura média do planeta devido a emissões antrópicas de gases responsáveis pelo efeito estufa. O resultado final é medido em kg equivalente de CO<sub>2</sub>. Para que as emissões de cada gás do efeito estufa seja convertido em equivalente de CO<sub>2</sub>, é utilizado o Potencial de Aquecimento Global - GWP, que é um indicador da contribuição relativa da emissão na

atmosfera de 1 t de um determinado Gás de Efeito Estufa - GEE. Este depende do tempo de vida na atmosfera, do forçamento radiativo e do intervalo de tempo de análise (horizonte de tempo). Para um horizonte de tempo relativo de 100 anos, o CO<sub>2</sub> apresenta GWP=1, CH<sub>4</sub> de 23, N<sub>2</sub>O de 296 e CFCs e HFCs um GWP de 4.600 a 10.600 respectivamente. Portanto, para 1 tonelada de clorofluorcarbonetos, os mesmos contribuem de 4.600 a 10.600 vezes mais para os impactos relacionados ao aquecimento global em um horizonte de tempo de 100 anos do que o gás carbônico (MIRANDA, 2012);

- b) Acidificação: fenômeno relacionado à precipitação de gases compostos por óxidos de enxofre e nitrogênio, bem como amoníacos, responsáveis pela chuva ácida. Tem impacto direto na agricultura, transportes e energia por meio da degradação de florestas, lagos e construções (RODRIGUES, 2015);
- c) Eutrofização: fenômeno de aumento da concentração de nutrientes em níveis anormais, essencialmente de compostos de nitrogênio e fósforo, podendo causar uma mudança na composição de espécies nos ecossistemas e redução da diversidade biológica tanto de organismos aquáticos quanto terrestres (RODRIGUES, 2015).
- d) Toxicidade Humana e Ecotoxicidade: categorias relacionadas com a presença de substâncias tóxicas que afetam a saúde humana e de outras espécies e ecossistemas, como: metais pesados, que podem se infiltrar em camadas subaquáticas (lençóis freáticos) tornando a água imprópria para consumo; substâncias químicas voláteis e pesticidas, que estão relacionados com problemas respiratórios e oculares (RODRIGUES, 2015).

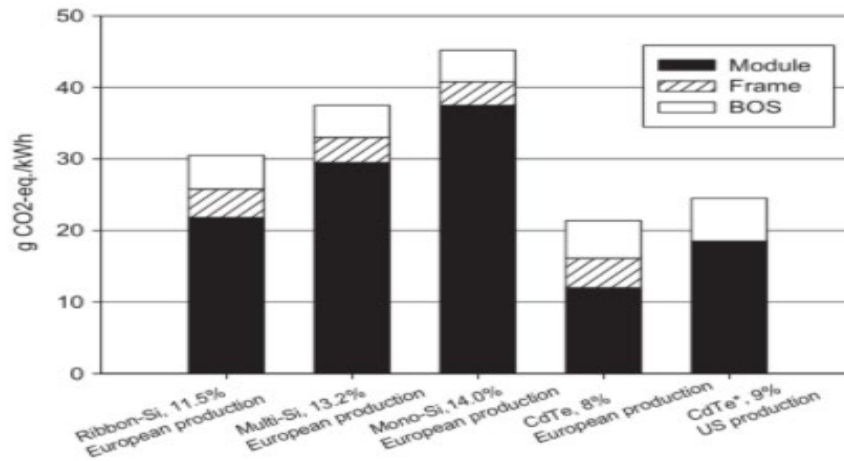
## 2.5 RESULTADOS

Baseado nos trabalhos selecionados, os resultados e breve discussão estarão divididos em seções, de acordo com as tecnologias fotovoltaicas analisadas em cada trabalho. Devido à extensão dos resultados, serão abordadas apenas as principais categorias de impactos, ou seja, aquelas que se repetiram mais nos estudos, principalmente para o aquecimento global, acidificação e eutrofização. Foi analisado também o tempo de retorno de energia (*Energy Pay Back Time* - EPBT), que apesar de não ser uma categoria de impacto da ACV, é um usual indicador de viabilidade da tecnologia de geração da energia solar.

### 2.5.1 Células de silício e de CdTe

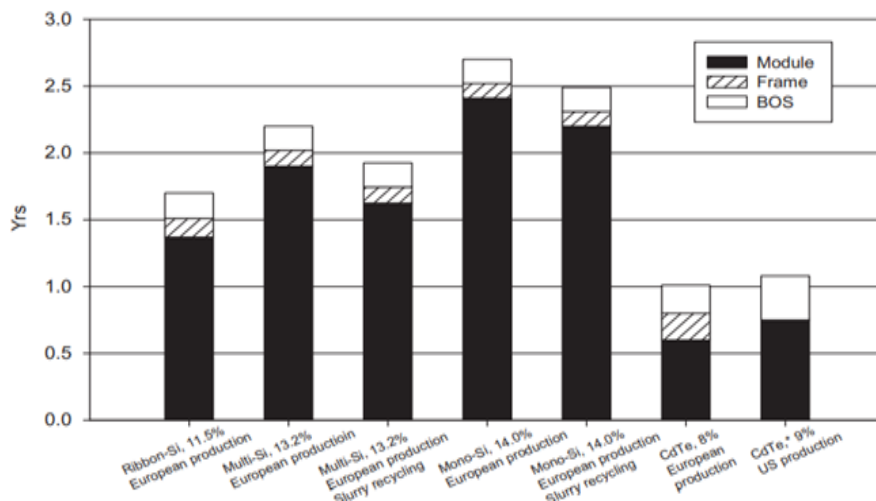
Os resultados obtidos por Fthenakis e Kim (2010) quanto à emissão de gases do efeito estufa está representado na Figura 1, mostrando que as tecnologias de silício mono e policristalino são os mais impactantes, atingindo entre 30 e 45 g de CO<sub>2eq</sub>/kWh de energia gerada. Na Figura 2, para o tempo de retorno de energia, a tecnologia de CdTe é a mais eficiente, precisando de apenas 1 ano para produzir toda a energia utilizada na sua fabricação, enquanto que a monocristalina ultrapassa os 2,5 anos.

Figura 1 - Emissão de gases do efeito estufa



Fonte: FTHENAKIS; KIM, 2010.

Figura 2 - Tempo de Retorno de Energia

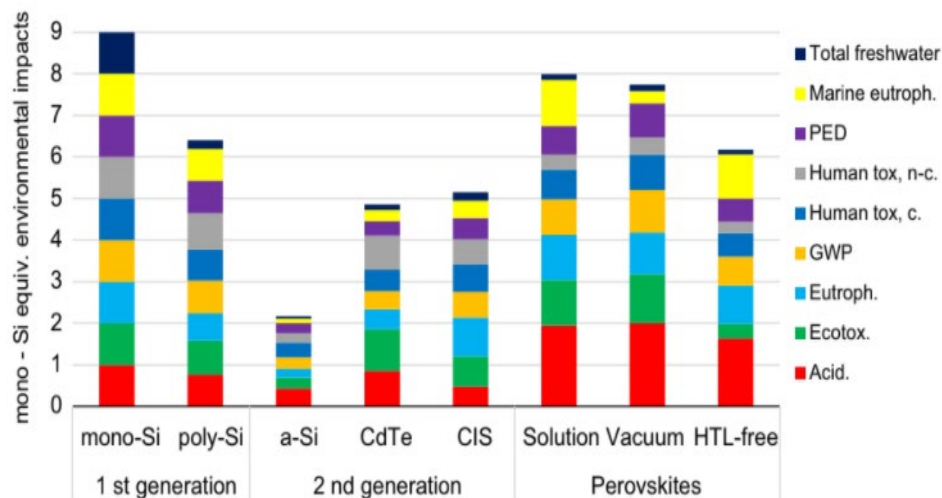


Fonte: FTHENAKIS; KIM, 2010.

## 2.5.2 Células de Perovskitas e Tecnologias Tradicionais

Celik *et al.* (2016) realizaram estudo com três tipos de células de Perovskitas, cujos resultados estão representados na Figura 3 (PED indica demanda de energia primária), os quais foram normalizados para as células de silício monocristalino ao comparar as tecnologias fotovoltaicas com relação a algumas categorias de impacto.

Figura 3 - Normalização para as três gerações de FV e suas categorias de impacto



Fonte: CELIK *et al.*, 2016.

Os resultados indicam que as células de silício amorfo são as que menos impactam nas categorias de potencial de aquecimento global, acidificação e eutrofização, além disso, os impactos ambientais das perovskitas foram menores que os de silício monocristalino. Observa-se também que a categoria de acidificação foi a mais impactada pelas células de perovskitas.

## 2.5.3 Células PERC e monocristalinas

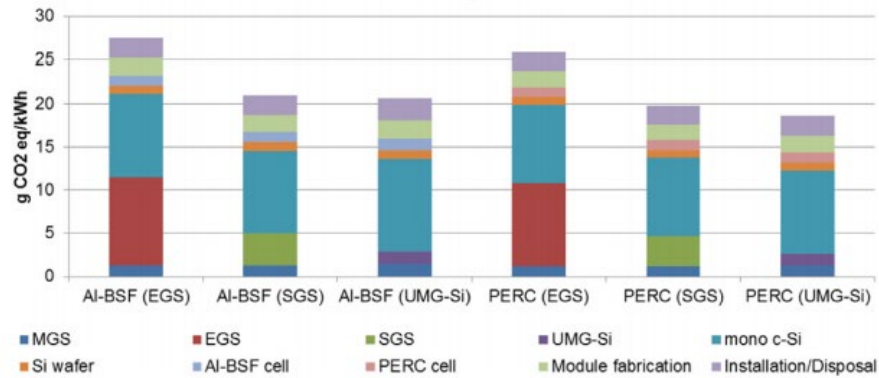
Lunardi *et al.* (2018) realizou uma comparação do potencial de aquecimento global (Figura 4), potencial de eutrofização de água doce (Figura 5) e tempo de retorno de energia (Figura 6) entre módulos solares monocristalinos Al-BSF e PERC, considerando as matérias-primas de silício grau eletrônico (EGS), silício grau solar (SGS) e silício grau metalúrgico (UMG-Si) através do método da ACV.

As células PERC com produção a partir de silício grau metalúrgico foram as que menos impactaram na categoria de potencial eutrofização da água doce e de aquecimento atingindo



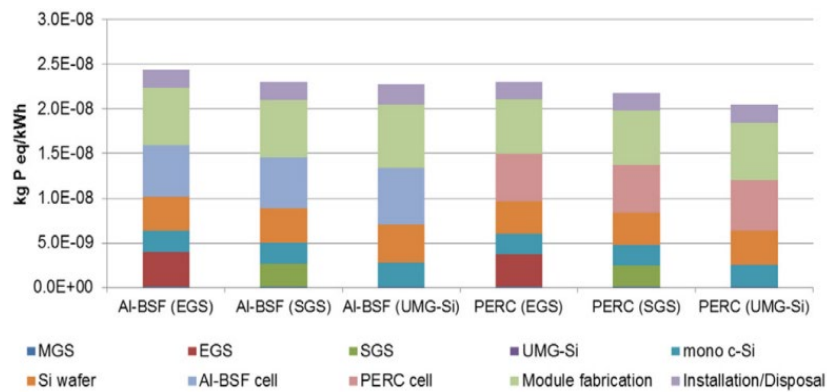
aproximadamente 18 g de CO<sub>2</sub>-eq./kWh de energia gerada. Além disso, foram as que apresentaram, também, menor tempo de retorno de energia dentre as tecnologias comparadas.

Figura 4 - Potencial de aquecimento global



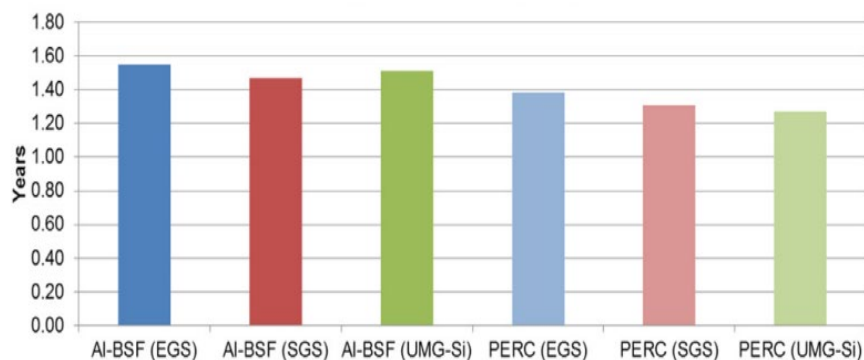
Fonte: LUNARDI *et al.*, 2018.

Figura 5 - Potencial de eutrofização da água doce



Fonte: LUNARDI *et al.*, 2018.

Figura 6 - Tempo de retorno de energia



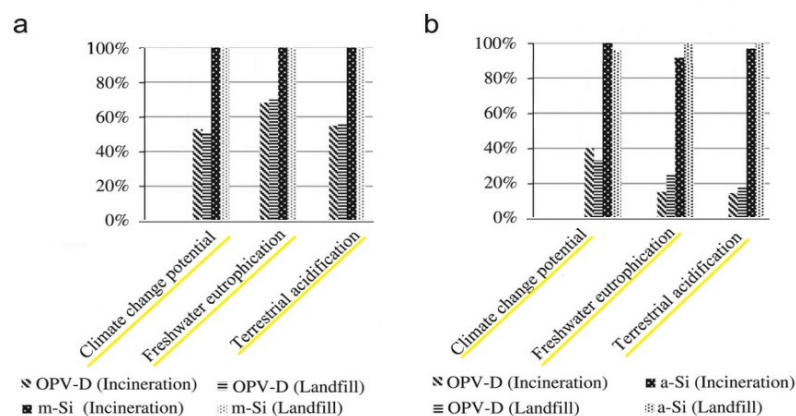
Fonte: LUNARDI *et al.*, 2018.

## 2.5.4 Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPV) e tecnologias convencionais de silício

Tsang *et al.* (2016) realizaram estudo de ACV avaliando os impactos potenciais do ciclo de vida do berço ao túmulo de OPV e tecnologias convencionais de silício. Os autores examinaram *designs* com visão de futuro da tecnologia OPV (por exemplo, todas as camadas ativas de polímero), diferentes tipos de usos que os OPV podem servir e opções atualmente viáveis de final de vida (incineração e aterro) para dois tipos de sistemas: um painel solar no telhado (durante uma fase de uso de 25 anos) e um carregador solar portátil (5 anos). Esse estudo assumiu uma vida útil de 5 anos para cada tecnologia OPV descrita acima. Dada esta vida útil, os painéis OPV precisaram ser substituídos 4 vezes (5 instalações no total) durante o período de 25 anos, a fim de realizar comparação com o módulo de silício convencional, cuja vida útil é de 25 anos.

Os resultados obtidos por Tsang *et al.* (2016) são representados na Figura 7, na qual são ilustrados os impactos padrão relativos da tecnologia OPV com arranjo de telhado comparando com painéis m-Si e a tecnologia com uso de carregador portátil, comparando o OPV padrão com painéis de silício amorfo. Além disso, dois processos de descarte separados são mostrados para cada sistema.

Figura 7 - Impactos ambientais para sistema OPV como (a) arranjo em telhado e (b) carregador portátil



Fonte: TSANG *et al.*, 2016.

Observando-se apenas as categorias de acidificação, potencial de mudança climática (neste caso, semelhante à categoria do potencial de aquecimento global) e eutrofização, os resultados indicam que houve maior diminuição de impactos ambientais no sistema fotovoltaico orgânico como carregador portátil, do que com instalação em telhados. O destino final a ser dado aos painéis sendo incineração ou aterro sanitário teve pouca relevância em termos de impactos ambientais.

### 2.5.5 Sistema fotovoltaico de alta concentração (CPV), tecnologias convencionais de silício e de filme fino (CdTe)

Fthenakis e Kim (2012) realizaram estudo sobre sistema de concentração fotovoltaica para as placas Amonix 7700 e estimaram o potencial de aquecimento global e tempo de retorno de energia (Tabela 1), em que a placa CPV Amonix 7700 foi comparada às células de silício monocristalino e de CdTe.

Tabela 1 - Potencial de aquecimento global e tempo de retorno de energia

Tecnologia	Potencial de aquecimento global (g CO <sub>2</sub> -eq./kWh)	Tempo de retorno de energia (anos)
CPV Amonix 7700 <sup>1</sup>	27	0,9
Silício monocristalino <sup>2</sup>	39	1,8
Filme fino de CdTe <sup>2</sup>	13	0,6

Fonte: <sup>1</sup>FTHENAKIS *et al.*, 2012. <sup>2</sup>FTHENAKIS *et al.*, 2009.

Quadro 1 - Características dos trabalhos de Avaliação de Ciclo de Vida de módulos fotovoltaicos selecionados

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Tecnologias analisadas</b>	<b>Categorias de Impacto analisadas</b>	<b>Ciclo de Vida</b>
Fthenakis, V.M., Kim, H.C. (2010)	Photovoltaics: Life-Cycle Analyses	Células de filmes de silício, silício policristalino, silício monocristalino e CdTe	Tempo de retorno de energia, emissão de gases de efeito estufa, emissão de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e de metais pesados.	Extração da MP até gerenciamento de fim de vida.
Celik, I., Song, Z., Cimaroli, A.J., Yan, Y., Heben, M.J., Apul, D. (2016)	Life Cycle Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to fab	Células de silício amorfo, policristalino e monocristalino, células de CdTe, CIS e perovskita	Eutrofização, acidificação, toxicidade humana (efeitos do câncer, efeitos não-cancerígenos) ecotoxicidade, potencial de aquecimento global e demanda de energia primária.	Extração da MP até o gerenciamento de fim de vida.
Lunardi, M.M., Alvarez-Gaitan, J.P., Chang, N.L., Corkish, R. (2018)	Life Cycle Assessment on PERC solar modules	Módulos solares monocristalinos Al-BSF e PERC	Aquecimento global, toxicidade humana (efeitos do câncer, efeitos não-cancerígenos), eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, depleção abiótica e tempo de retorno de energia.	Extração da MP até o uso (exceto BOS e transporte).
Tsang, MP., Sonnemann, G.W., Bassani, D.M. (2016)	Life-Cycle Assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies	Células orgânicas de polímeros (OPV) e células de silício convencionais	Mudanças climáticas, eutrofização, acidificação, toxicidade humana, depleção fóssil, ecotoxicidade, uso de água e do solo, demanda de energia acumulada, radiação ionizante, entre outros.	Extração da MP até o gerenciamento de fim de vida.
Fthenakis, V.M., Kim, H.C. (2012)	Life Cycle Assessment of high-concentration photovoltaic systems	Célula solar III-V, GaInP / GaInAs / Ge (células de CPV)	Tempo de retorno de energia, emissão de gases de efeito estufa, uso do solo e da água.	Aquisição dos materiais até gerenciamento de fim de vida.

Fonte: Elaboração própria baseada nas referências citadas.

## 2.6 DISCUSSÃO

### 2.6.1 Células de silício e de filme fino de CdTe

No âmbito do estudo de Fthenakis e Kim (2010), a célula de silício monocristalino foi a que apresentou maior impacto sobre a categoria de emissão de gases do efeito estufa e também maior tempo de retorno de energia, quando comparada aos outros tipos de tecnologias consideradas. De fato, os resultados de Celik *et al.* (2016) também mostram que as células de mono-Si foram as que mais impactaram nas categorias de eutrofização, acidificação e potencial de aquecimento global e com relação às outras tecnologias. Para Lunardi *et al.* (2018), a produção do silício monocristalino também apresentou maior contribuição na categoria de impacto de potencial de aquecimento global. Esses resultados estão relacionados com o ciclo de vida das células, uma vez que o crescimento dos *lingotes* de silício monocristalino pelo processo *Czochralski* é complexo e demanda uma quantidade de energia maior, quando comparado aos outros tipos de células. Segundo Fthenakis *et al.*, (2010), as emissões de poluentes durante o ciclo de vida de um sistema fotovoltaico são proporcionais à quantidade de combustível fóssil queimado, principalmente durante o processamento do material fotovoltaico. Foi descrito também que as emissões diferem nos países, dependendo do perfil da matriz elétrica da região de fabricação dos módulos, uma vez que países que utilizam mais combustível fósseis, geram também mais gases de efeito estufa (FTHENAKIS *et al.*, 2010). De fato, é possível observar na Figura 1 que os impactos gerados são ligeiramente maiores com a produção das células de CdTe nos EUA, quando comparada com a produção Europeia.

### 2.6.2 Células de Perovskita

Conforme os estudos de Celik *et al.*, (2016), os resultados da Figura 3 mostram que as células de Perovskitas apresentam impacto geral menor que as células de silício monocristalino e que as mesmas contribuem mais na acidificação do que as outras tecnologias. Segundo os autores, o motivo da alta acidificação deve-se às emissões de compostos de enxofre (sulfato, enxofre e sulfeto) na água doce durante a produção de eletricidade e extração de estanho. Quanto ao menor impacto provocado pelas células de Perovskitas com relação as de silício monocristalino, esse resultado é reflexo do processo produtivo das células de mono-Si, mais complexos e que demandam quantidade de energia maior, conforme explicitado na seção 3.1.1.

### 2.6.3 Células PERC

Nesse estudo, os autores Lunardi *et al.* (2018) realizaram ACV de células PERC e células Al-BSF produzidas a partir de silício grau metalúrgico, grau solar e grau eletrônico. De forma geral, em quase todas as categorias de impacto avaliadas, as tecnologias produzidas com silício grau eletrônico apresentaram maiores impactos ambientais. Isso se deve ao fato de que as etapas envolvidas na purificação do silício demandam maior energia no caso do silício grau eletrônico, que apresenta a pureza mais elevada, dentre os três tipos (LUNARDI *et al.*, 2018).

Por outro lado, as células produzidas a partir do silício de grau metalúrgico apresenta maiores impactos na categoria de ecotoxicidade da água doce, que está relacionada com emissão de metais pesados e outros materiais particulados. Isso se deve ao fato de que células de UMG-Si apresentam menores eficiências, sendo necessário uma quantidade maior de módulos fotovoltaicos para suprir essa eficiência menor, fazendo com que demandem maior quantidade de materiais para fabricação, sobretudo a pasta à base de prata e vidro. Além disso, de acordo com os resultados obtidos, as células de Al-BSF apresentaram maiores impactos na maior parte das categorias avaliadas. Segundo os autores, as maiores eficiências apresentadas pela tecnologia PERC, está no fato de que estas demandam menor energia para produzir a menor área do módulo necessária para coletar a mesma quantidade de energia solar durante a vida útil do módulo, o que está de acordo com o que foi explicado na seção 3.3.3.

### 2.6.4 Células orgânicas

De acordo com os resultados obtidos no estudo de Tsang *et al.* (2016), ambos os tipos de sistema de tecnologia orgânica fotovoltaica apresentaram menores impactos sobre as categorias, com relação às células de silício convencionais, exceto com relação à depleção de metais (categoria não abordada neste artigo), fato que se deve à demanda de FTO, eletrodo de óxido de estanho dopado com flúor, utilizado na fabricação das placas orgânicas. Foi observado que houve maior diminuição de impactos ambientais no sistema fotovoltaico orgânico como carregador portátil, do que como instalação em telhados. Isso se deve principalmente ao fato de que há necessidade de substituição dos painéis da instalação em telhado muitas vezes ao longo da sua fase de estudo, devido ao diferente tempo de vida entre as tecnologias estudadas (25 anos para as células de silícios e 5 anos para as OPV).

Importante observar que para o sistema com instalação em telhados, não houve diferenças perceptíveis quanto ao tipo de descarte (aterro ou incineração), diferentemente dos

carregadores portáteis, uma vez que os impactos das mudanças climáticas para OPV-D foram 4% maiores para instalação em telhados e 26% maiores para os carregadores portáteis (TSANG *et al.*, 2016). Esta é uma consequência da combustão dos componentes plásticos que envolvem os carregadores e que liberam CO<sub>2</sub> durante o processo.

### **2.6.5 Sistema fotovoltaico de alta concentração - CPV**

De acordo com os autores Fthenakis e Kim (2012), no que se refere ao tempo de retorno de energia (TRE) e emissão de gases de efeito estufa (GEE), o sistema fotovoltaico de alta concentração Amonix 7700 (TRE de 0,9 ano e 27 g CO<sub>2</sub> eq./kWh) apresenta vantagem significativa sobre a célula de silício monocristalino, entretanto, fica atrás das células de CdTe. Entretanto, o sistema de alta concentração consegue obter resultados melhores ou semelhantes no que se refere às categorias de uso da água e transformação da terra (categorias que não são o foco neste artigo), que está relacionada sobretudo com o uso de recursos, emissão de metais pesados e gases poluentes. Isso se deve principalmente a alta eficiência dessas células, com relação as outras tecnologias de silício e de CdTe, fazendo com que seja necessária uma quantidade menor de placas fotovoltaicas para gerar a mesma quantidade de energia (FTHENAKIS *et al.*, 2012).

### **2.6.6 Parâmetros ambientais para escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica**

Esses resultados mostram os impactos gerados em cada uma das tecnologias, quando comparadas, sobretudo às células de silício convencionais. Entretanto, não é possível estabelecer uma comparação direta entre as tecnologias, visto que os métodos utilizados, bem como os países considerados na produção das placas na etapa da aquisição de dados do inventário são diferentes. Para estabelecer uma comparação mais eficaz entre as tecnologias, é necessário a realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida mais completa com os diversos tipos de células, partindo de uma mesma base de dados do inventário, como a matriz elétrica e disponibilidade de transportes da mesma região, e que contemple as mesmas etapas do processo (desde a extração da matéria-prima, até a destinação pós consumo), o que auxiliaria em uma tomada de decisão baseada em dados harmonizados, assim como o tempo de vida dos painéis, que varia entre as tecnologias comparadas e até mesmo entre tipos de painéis a depender do elementos construtivos do painel. Entretanto, o conhecimento das principais categorias de

impacto é uma etapa essencial na construção dos critérios para escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica, além disso, a distância entre o local da produção e o local do uso também pode afetar os indicadores dos impactos ambientais.

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mercado de produção e pesquisa de tecnologias de geração de energia solar fotovoltaicas apresenta-se vasto, com diversos tipos de células e matérias-primas empregadas, motivada pela constante busca por maiores eficiências de conversão. Entretanto, células de primeira geração ainda correspondem ao tipo mais utilizado nas instalações de placas solares no mundo devido à sua taxa de eficiência de conversão razoável, disponibilidade de matéria-prima e tempo de vida útil superior às novas tecnologias, detendo 95% da participação na produção fotovoltaica mundial, o que indica a dificuldade dos outros tipos de células em se estabelecerem no mercado atual, uma vez que, apesar de apresentarem custo reduzido (\$/kWp) com relação às tecnologias de primeira geração, seu tempo de vida útil ainda não é compatível com as células de silício cristalino tornando-as a longo prazo mais onerosas.

As principais categorias de impacto, e portanto, parâmetros ambientais utilizados nos trabalhos selecionados são o potencial de aquecimento global, tempo de retorno de energia, eutrofização e acidificação. Nos trabalhos selecionados, as células de silício cristalino, sobretudo monocristalino, foram as que mais apresentaram impactos ambientais nas categorias avaliadas, o que indica oportunidade para melhorias através das tecnologias emergentes – principalmente as da terceira geração (células orgânicas fotovoltaicas com produção no estado de Minas Gerais) , quando avaliadas do ponto de vista ambiental.

Outros tipos de tecnologias de segunda geração foram pesquisados como GaInP/GaAs, Silício amorfo multijunção, CuZnSnS<sub>4</sub> e Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> e CIGS (MOHR *et al.* 2009; KIM & FTHENAKIS, 2011; COLLIER *et al.*, 2014; BERGENSEN *et al.*, 2014; *apud* MUTERI *et al.*, 2020), porém como são tecnologias ainda de laboratórios (não comerciais) e com uma imprecisão de dados de produção em escala industrial, assim como seus tempos de vidas úteis, não foram consideradas nesse trabalho, mas espera-se que com o desenvolvimento de novas pesquisas, as mesmas possam surgir no mercado e possam substituir as atuais tecnologias, trazendo ganhos ambientais como demonstrados em escala de laboratórios.

Tendo em vista a dificuldade de se comparar diretamente todas as tecnologias, já que foram feitos estudos com bases de dados e critérios diferentes, uma sugestão de futuros trabalhos é a realização da ACV com as principais tecnologias disponíveis e que contemple as



mesmas etapas dos processos (desde a extração da matéria-prima, até a mesma destinação pós consumo), unidade funcional, base de dados, método e temporalidade de vida útil para a mesma tecnologia e acessórios operacionais do sistema de geração (*BOS*) para assim possibilitar aos usuários desse tipo de energia escolher a placa fotovoltaica com base, também, nos critérios ambientais.

## REFERÊNCIAS

- BIZERRA, A.M.C., QUEIROZ, J.L.A., COUTINHO, D.A.M. O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v.13, n. 3, p. 299-315, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2GkHAZK>. Acesso em: 22 ago. 2020.
- CELIK, I., SONG, Z., CIMAROLI, A.J., YAN, Y., HEBEN, M.J., APUL, D. Life Cycle Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to fab. **Journal Elsevier: Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 156, p. 157-169, nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.037>. Acesso em: 23 ago. 2020.
- FTHENAKIS, V.M., KIM, H.C. Life cycle assessment of high concentration photovoltaic systems, **Wiley Online Library**, Prog. Photovolt, vol. 21, p. 379-388, New York, 2012. Disponível em: <https://bit.ly/3bgvLPu>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- FTHENAKIS, V.M., KIM, H.C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Elsevier: Solar Energy**, v. 85, p. 1609-1628, New York - EUA, 2011. Disponível em: <https://bityli.com/8Le5G>. Acesso em: 22 ago. 2020.
- HOMEADVISOR. Average Price of Solar Panels. **TrueCosts Guide**, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3glZSAo>. Acesso em: 01 set. 2020.
- IRENA. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (**A Global Energy Transformation: paper**), **International Renewable Energy Agency (IRENA)**. Abu Dhabi, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3lzdphD>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- IRENA. Renewable Energy Technologies: cost analysis series. **International Renewable Energy Agency. Power Sector**, V.1, Abu Dhabi, jun. 2012. Disponível em: <https://bityli.com/uxz4f>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- LIMA, A.A., MENEZES, N.P., SANTOS, S., AMORIM, B., THOMAZI, F., ZANELLA, F., HEILMANN, A., BURKARTER, E., DARTORA, C.A. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, São Paulo, out. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/34SWikK>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- LUNARDI, M.M., ALVAREZ-GAITAN, J.P., CHANG, N.L., CORKISH, R. Life Cycle Assessment on PERC solar modules. **Elsevier: Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 187, p. 154-159. Australia, ago. 2018. Disponível em: <https://bityli.com/s2mzy>. Acesso em: 22 ago. 2020.

MIRANDA, M.M. **Fator de emissão de fases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil**: implicações da aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <https://bityli.com/oYYDo>. Acesso em: 22 ago. 2020.

MENDES, N.C. **Métodos e modelos de caracterização para Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida**: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produto) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <https://bityli.com/6NidV>. Acesso em: 18 ago. 2020.

MUTERI, V.; CELLURA, M.; CURTO D.; FRANZITTA, V.; LONGO, S.; MISTRETTA, M.; PARISI, M. L. Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. **Energies**. v. 13, p. 252, 2020. Doi:10.3390/en13010252

NIEDZIALKOSKI, K.R. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. PR, 2013. Disponível em: <https://bityli.com/RG2SG>. Acesso em: 20 ago. 2020.

RAPHAEL, E., SILVA, M.N., SZOSTAK, R., SCHIAVON, M.A., NOGUEIRA, A.F. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, São Paulo, v. 41, n.1., p.61-74, out, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3bhaXaJ>. Acesso em: 17 ago. 2020.

RODRIGUES, T.O. Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida - ACV: apostila. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT**. Brasília, 2015. Disponível em: <https://bityli.com/jn21o>. Acesso em: 22 ago. 2020.

SAMPAIO, J.A., AMADO, R.S., MARQUES, P.S.G, SOARES, L.G.L. Silício Grau Solar - Uma Revisão das Tecnologias de Produção. **CETEM - Centro de Tecnologia Mineral**. Série Rochas e Minerais Industriais, n. 26, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bityli.com/V27vm>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SANTOS, H.F.L., COSTA, P.V.M. Concentradores fotovoltaicos: uma tecnologia em declínio? **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, abril, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3IPINK2>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SIMIONI, T. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://bityli.com/ZPRXO>. Acesso em: 20 ago. 2020.

TAKATA, M. Tecnologias de módulos e células fotovoltaicas. **Agência Canal Energia**. Rio de Janeiro, out. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/351h4yC>. Acesso em: 24 ago. 2020.

TSANG, M.P., SONNEMANN, G.W., BASSANI, D.M. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. **Elsevier: Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 37-48, France, april, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.024>. Acesso em: 20 ago. 2020.

VALVERDE, G. R.; CHERNI, J. A.; URBINA, A. Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. **Prog. Photovolt. Res. Appl.** v. 18, p. 535-538, 2010.

ZEGHBROECK, B.V. **Principles of Semiconductor Devices**. University of Colorado Boulder. Boulder, 2006. Disponível em:  
<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>. Acesso em: 01 set. 2020.

### MINI CURRÍCULO E CONTRIBUIÇÕES AUTORES

<b>TÍTULO DO ARTIGO</b>	<b>TECNOLOGIAS E PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA A ESCOLHA DE UMA PLACA GERADORA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b>
<b>RECEBIDO</b>	02/09/2020
<b>AVALIADO</b>	07/11/2020
<b>ACEITO</b>	09/11/2020

<b>AUTOR 1</b>	
PRONOME DE TRATAMENTO	Srta.
NOME COMPLETO	Patrícia Fagundes Góes
INSTITUIÇÃO/AFILIAÇÃO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)
CIDADE	Salvador
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
RESUMO DA BIOGRAFIA	Acadêmica do curso bacharelado em Engenharia Química no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA). Técnica em Química pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA). Pesquisadora do grupo de pesquisa Ecologia Industrial - ECOIN do IFBA, no tema de energia solar fotovoltaica.
<b>AUTOR 2</b>	
PRONOME DE TRATAMENTO	Sr.
NOME COMPLETO	Armando Hirohumi Tanimoto
INSTITUIÇÃO/AFILIAÇÃO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)
CIDADE	Salvador
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
RESUMO DA BIOGRAFIA	Doutor em Gestão e Políticas Ambientais pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável / UnB (2010) com estágio de pesquisa (doutorado sanduiche - CAPES/2009) na Universidade Autônoma de Barcelona - UAB, mestre em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo / UFBA (2004), Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia / IFBA campus Salvador. Experiência na área de processos produtivos, segurança industrial e meio ambiente no ramo químico e petroquímico, atuando principalmente em projetos de Produção mais Limpa, Simbiose Industrial, Gestão de Resíduos Sólidos Industriais e Diagnósticos Ambientais. Membro da Comissão Interna de Sustentabilidade Ambiental - CISA, do campus de Salvador (2013 - atual) e ex-coordenador técnico do Plano de Gestão da Energia Elétrica do IFBA.
CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR NO ARTIGO	Todos os autores contribuíram na mesma proporção.

Endereço de Correspondência dos autores	<b>Autor 1:</b> <a href="mailto:patriciafag3@gmail.com">patriciafag3@gmail.com</a> / <a href="mailto:patricia.goes@ifba.edu.br">patricia.goes@ifba.edu.br</a> <b>Autor 2:</b> <a href="mailto:armando.tanimoto@gmail.com">armando.tanimoto@gmail.com</a> , <a href="mailto:armando@ifba.edu.br">armando@ifba.edu.br</a>
---	--