

# Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente

Gustavo Leite Gonçalves<sup>[1]</sup>, Louise Pereira da Silva<sup>[2]</sup>, Paula Rose de Araújo Santos<sup>[3]</sup>, Monica Carvalho<sup>[4]</sup>, Raphael Abrahão<sup>[5]</sup>

[1]gustavoleite@cear.ufpb.br. [2]louise.silva@cear.ufpb.br. [3]paularose@cear.ufpb.br. Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis. [4]monica@cear.ufpb.br. [5]raphael@cear.ufpb.br. Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis.

## RESUMO

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia que estuda os aspectos ambientais e os potenciais impactos associados a um produto ou serviço por meio da elaboração de um inventário de recursos. Dentre os vários indicadores que mensuram esses impactos, a pegada de carbono se destaca por analisar as emissões de gases de efeito estufa derivados de uma atividade, processo ou produto. Assim, este trabalho objetiva comparar a pegada de carbono de um sistema fotovoltaico convencional e um semitransparente, dimensionados para atender uma demanda energética de 386 kWh/dia. Observou-se no sistema de painéis convencionais maiores valores de pegada de carbono, totalizando 3623 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano, enquanto o semitransparente obteve 2726 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano. Nos dois casos, as células fotovoltaicas e as estruturas de alumínio responderam pela maior contribuição à pegada de carbono, além do significativo aporte atribuído aos vidros solares. Também foi calculado o fator de emissão, cujo valor refere-se à capacidade de produção elétrica com a pegada de carbono, obtendo-se 0,0257 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh para o sistema convencional e 0,0193 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh para o semitransparente. Conclui-se que, entre os sistemas analisados, o semitransparente possui um fator de emissão menor que o convencional, colocando-se como melhor opção do ponto de vista do indicador utilizado.

**Palavras-chave:** Aquecimento global. Avaliação de ciclo de vida. Energia solar. Gases de efeito estufa. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

*The Life Cycle Assessment is a methodology that studies the environmental aspects and the potential impacts associated with a product or service through the formulation of an inventory of resources. Among the various indicators that measure environmental impacts, the carbon footprint stands out for analyzing the greenhouse gas emissions derived from an activity, process or product. The objective of this work is to compare the carbon footprint of a conventional photovoltaic system and a semitransparent one, designed to meet an energy demand of 386 kWh/day. A higher carbon footprint was obtained for the conventional panel system, totaling 3623 kg CO<sub>2</sub>-eq/year, while the semitransparent system emitted 2726 kg CO<sub>2</sub>-eq/year. In both cases, photovoltaic cells and aluminum structures accounted for the greatest contribution to the carbon footprint, in addition to the significant contribution of solar glass. The emission factor was also calculated, associating the electric production capacity with the carbon footprint, obtaining 0.0257 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh for the conventional system and 0.0193 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh for the semitransparent system. From the carbon footprint viewpoint, the semitransparent system is the best option, with significantly lower emissions.*

**Keywords:** Global warming. Greenhouse gases. Life cycle assessment. Solar energy. Sustainability.

## 1 Introdução

Apesar de as fontes renováveis de energia serem afetadas pelas mudanças climáticas (IPCC, 2014), a utilização das energias renováveis, como a solar e a eólica, ainda é uma estratégia amplamente aplicada para reduzir as emissões dos gases intensificadores do efeito estufa na atmosfera (QUEIROZ *et al.*, 2016).

De acordo com o princípio do efeito fotoelétrico, as células fotovoltaicas convertem a luz solar em eletricidade (MAGRASSI *et al.*, 2019). Este efeito ocorre devido à composição das células serem de materiais semicondutores, que permitem o fluxo de elétrons e que são liberados à medida que os fótons da luz solar são absorvidos pelo material (HUSAIN *et al.*, 2018).

O painel fotovoltaico semitransparente é uma tecnologia que vem sendo inserida no mercado de energia solar fotovoltaica. Os módulos fotovoltaicos semitransparentes diferem dos módulos fotovoltaicos convencionais, porque desempenham papéis multifuncionais. Além da conversão elétrica, funcionam como elementos na construção civil, podendo ser aplicados em vidros e janelas, garantindo um design inovador (PARK *et al.*, 2010; WONG *et al.*, 2008).

A translucidez facilita a inserção da radiação solar através do painel, estimulando o uso da luz solar durante o dia (WONG *et al.*, 2008). A irradiância solar, a temperatura, o sombreamento, o ângulo de instalação e a orientação dos módulos fotovoltaicos são fatores importantes a serem considerados no momento da instalação, pois a eficiência elétrica do painel fotovoltaico semitransparente pode ser altamente afetada (PARK *et al.*, 2010).

A energia solar fotovoltaica em si é considerada uma energia limpa e de baixas emissões, mas por outro lado, os materiais utilizados na produção dos painéis podem gerar impactos negativos (WU *et al.*, 2017), como o silício, vidro, metais, sistemas de cabos e equipamentos interligados ao painel. O impacto ambiental do silício na fabricação das células fotovoltaicas é elevado porque o processo metalúrgico para purificação tem uma alta demanda de energia (KLUGMANN-RADZIEMSKA; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, 2020). Além do impacto da produção do silício, outro ponto importante é o estágio de descarte, podendo ser menos danoso ao meio ambiente através da reciclagem ou da reutilização (KLUGMANN-RADZIEMSKA; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, 2020).

A partir da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é possível avaliar o desempenho e os impactos

negativos relacionados a um produto, processo ou serviço (GERBINET; BELBOOM; LÉONARD, 2014; WU *et al.*, 2017). Considerando a crescente demanda do uso de painéis fotovoltaicos e os potenciais impactos atribuídos, desde a sua produção até o momento do seu funcionamento, o desenvolvimento de ACVs é necessário para quantificar os impactos ambientais associados ao atendimento de demandas elétricas.

O objetivo deste trabalho foi comparar a pegada de carbono, calculada por meio da ACV, de um sistema fotovoltaico convencional e um sistema fotovoltaico semitransparente, avaliando seus fatores de emissão para entender qual sistema é a melhor opção do ponto de vista ambiental.

## 2 Referencial teórico

A ACV é uma metodologia recomendada para estudar os aspectos ambientais e os potenciais impactos associados a uma atividade, um processo ou um produto por meio da elaboração de um inventário de recursos (entradas e saídas de matéria e energia), assim como a avaliação dos impactos ambientais relacionados e da interpretação dos resultados com base no objetivo do estudo (MENOUIFI; CHEMISANA; ROSELL, 2013).

A Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization – ISO*), em sua série 14000 (ISO, 2006a), estabelece que a ACV pode auxiliar na manutenção do equilíbrio e da proteção ambiental, prevenindo a poluição e os problemas que esses poderiam trazer para a sociedade e economia. De acordo com as especificações das ISO 14040 (ISO, 2006b) e ISO 14044 (ISO, 2006c), um estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos, e interpretação.

O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular, de acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006b).

A fase de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a segunda fase de uma ACV. Trata-se de um inventário dos dados de entradas e saídas associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão (ISO, 2006b).

A terceira fase da ACV, prevista na ISO 14040 (ISO, 2006b), é a Avaliação de Impacto do Ciclo de

Vida (AICV). O objetivo da AICV é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A interpretação do ciclo de vida é o último procedimento da ACV, na qual os resultados de um ICV ou de uma AICV são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (ISO, 2006b).

### 3 Método da pesquisa

#### 3.1 Planejamento do estudo e desenvolvimento da ACV

O foco do presente estudo foi a comparação da pegada de carbono de um sistema fotovoltaico semitransparente e um convencional, dimensionados para suprir a mesma demanda energética. O objeto de estudo refere-se a um sistema solar fotovoltaico com conversão plena, atendendo a demanda energética de 386 kWh/dia e uma potência mínima de 65 kWp, correspondente à demanda energética da área externa do Complexo Turístico Serrote do Jatobá, na cidade de Pau dos Ferros, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

Para a produção dos inventários utilizados, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, identificando o tipo e as quantidades dos materiais presentes nos dois sistemas fotovoltaicos dimensionados e suas respectivas superfícies de fixação.

Este trabalho abrange os sistemas de captação, ou seja, os painéis fotovoltaicos e seu suporte. Não foram analisados inversores, cabos e sistemas de proteção, uma vez que estão presentes e são iguais em ambos os sistemas.

Para os cálculos da ACV utilizou-se o *software* SimaPro versão 9.0.0.49 (PRÉ SUSTAINABILITY, 2019), que segue as normas e recomendações das séries ISO 14040 e 14044. A base de dados Ecoinvent versão 3.5 (ECOINVENT, 2019) foi utilizada.

Existem diversas formas de mensurar impactos ambientais, dentre as quais, optou-se em analisar as influências para as alterações climáticas por meio do potencial de aquecimento global, pois esse desequilíbrio ambiental proporciona uma visão rápida, simplificada e fiável (ROYO *et al.*, 2016). Dessa forma, o

método de avaliação de impacto ambiental selecionado foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013), que agrupa as emissões de gases de efeito estufa ao longo de um horizonte de 100 anos em termos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq).

Para finalizar, calculou-se o Fator de Emissão (FE) expresso como a razão entre a pegada de carbono (kg CO<sub>2</sub>-eq) e a conversão de eletricidade (kWh) (WHITAKER *et al.*, 2012) (Eq. 1).

$$FE = \frac{\text{Pegada de carbono}}{\text{Geração}} \left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kWh}} \right] \quad (1)$$

#### 3.2 Descrição dos sistemas

A compilação do inventário do sistema convencional foi baseada no trabalho de Carvalho *et al.* (2019), que avaliaram um sistema fotovoltaico convencional com a utilização de painéis planos (AXITEC AC-260P/156-60S com 60 células de silício policristalino, de 156x156 mm<sup>2</sup> cada) com uma estrutura de fixação no telhado em alumínio 85% reciclado.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os inventários e as informações dos sistemas fotovoltaicos.

O sistema semitransparente foi baseado no estudo de Perez *et al.* (2012), composto por painéis solares constituídos de 131 células monocristalinas Astro Power AP-105 de 1.988 WDC, 127x127 mm<sup>2</sup> de área.

Para esse dimensionamento, foram considerados os valores da radiação solar no local, obtidos por meio do mapa solarimétrico do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB, chegando a um valor médio de 5,94 kWh/(m<sup>2</sup>.dia) (CRESESB, 2017).

Entre as áreas requeridas para os dois sistemas, existe uma diferença causada pelo tamanho padrão dos painéis e pelas diferentes eficiências derivadas dos diferentes materiais. Assim, para os painéis semitransparentes alcançarem uma potência semelhante aos convencionais, é exigido um número maior de células fotovoltaicas e, conseqüentemente, uma maior superfície, o que também explica a maior quantidade de vidro solar utilizado em sua confecção. Para as bases de fixação, optou-se por utilizar 85% de alumínio reciclado nos dois sistemas.

**Tabela 1** – Composição material do sistema fotovoltaico convencional

Descrição	Sistema Convencional		
Quantidade de painéis	250		
Potência (Wp)	260		
Área requerida (m <sup>2</sup> )	468		
Vida útil (anos)	25		
Composição dos painéis	Item	Valor Unitário	Valor Total
	Vidro solar (kg)	17,130	4.282,500
	Filme de polivinilfluoreto (kg)	0,187	46,750
	Célula fotovoltaica (multi-Si) (m <sup>2</sup> )	1,700	486,000
	Liga de alumínio (kg)	4,470	1.117,500
	Cobre (kg)	0,190	47,500
	Etilvinilacetato (kg)	1,700	425,000
	Plástico com reforço de fibra de vidro (kg)	0,319	79,625
Composição da fixação	Liga de alumínio reciclado (kg)	2,635	658,750
	Liga de alumínio (kg)	0,465	116,250
	Aço (baixa liga) (kg)	0,280	70,000
	Polietileno de alta densidade (kg)	2,020	505,000

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2019).

**Tabela 2** – Composição material do sistema fotovoltaico semitransparente

Descrição	Sistema Semitransparente			
Quantidade de painéis	250			
Potência (Wp)	260			
Área requerida (m <sup>2</sup> )	688			
Vida útil (anos)	30			
Composição dos painéis	Item	Valor Unitário	Valor Total	
	Vidro solar (kg)	40,085	10.021,250	
	EVA Photocap (kg)	2,480	620,000	
	Célula fotovoltaica (mono-Si) (m <sup>2</sup> )	2,113	528,225	
	Cobre (kg)	0,081	20,250	
	Estanho (kg)	0,005	1,250	
	Solda por imersão - Estanho (kg)	0,001	0,250	
	Solda por imersão - Chumbo (kg)	0,001	0,250	
	EVA (100-µm de espessura) (kg)	0,017	4,250	
	Poliéster (125-µm de espessura) (kg)	0,032	8,000	
	Fluoreto de polivinila (kg)	0,006	1,500	
	Camada adesiva (12-µm de espessura) (kg)	0,002	0,500	
	Composição da fixação	Fibra de vidro (kg)	4,230	1.057,500
		Resina fenol-ureia-formaldeído (kg)	0,350	87,500
Liga de alumínio reciclado (kg)		19,650	4.912,500	
Liga de alumínio (kg)		3,468	866,912	

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (2012).

## 4 Resultados e discussão

Na Tabela 3 é apresentada a pegada de carbono para os dois sistemas fotovoltaicos, além de seus valores associados com a vida útil individual e o Fator de Emissão (FE) relacionado com a capacidade de conversão elétrica de 386 kWh/dia (valor anual: 140.890 kWh).

O FE é um parâmetro essencial na avaliação dos impactos associados às etapas estudadas (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013), por isso se fez necessária uma ACV detalhada dos processos de fabricação e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, no caso desta pesquisa. O FE total retrata o produto de cada entrada de energia ou material pelos seus respectivos fatores de emissão individual (VARUN; BHAT; PRAKASH, 2009).

**Tabela 3** – Pegada de carbono e Fator de Emissão (FE): sistema fotovoltaico convencional vs. semitransparente para a produção de 386 kWh/dia

	Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Pegada de carbono anual (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	FE (kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh)
<b>Sistema Convencional</b>	90.565	3.623	0,0257
<b>Sistema Semitransparente</b>	81.784	2.726	0,0193

Fonte: Elaboração própria.

Estimou-se também a contribuição de cada material para a pegada de carbono total de ambos os sistemas fotovoltaicos, bem como seus processos associados. A pegada de carbono anual é utilizada como forma de comparação entre os resultados, pois é associada entre a proporcionalidade dos valores com suas vidas úteis (BUENO; HOYOS; CAPELLÁN-PÉREZ, 2017). Nas Figuras 1 e 2 (próxima página) são apresentados os materiais com maiores contribuições aos resultados finais. Em decorrência da grande variação na pegada de carbono dos materiais constituintes, alguns se tornaram irrisórios comparados aos outros, onde se observa que as células fotovoltaicas representam 93% e 99% de toda a carga de carbono dos sistemas estudados, respectivamente.

Dessa forma, verifica-se que as células fotovoltaicas são responsáveis pela maior contribuição para a pegada de carbono total. Isso traz à tona o impacto ambiental significativo decorrente da extração da matéria prima, processamento e utilização desses

equipamentos, principalmente quando se atenta a grande quantidade de células utilizadas nos sistemas fotovoltaicos (MENOUI; CHEMISANA; ROSELL, 2013). Os resultados encontrados se assemelham aos do estudo de Wild-Scholten (2013), que concluiu que nos sistemas fotovoltaicos (tanto mono-Si, quanto multi-Si) a extração do silício é responsável pela maior colaboração na contabilização da pegada de carbono.

Outro importante contribuinte para a pegada de carbono é o vidro solar. No sistema semitransparente, a quantidade de vidro é consideravelmente maior por causa das suas dimensões, uma vez que possui um número maior de células e espaços entre elas, por onde a luz se propaga. O maior responsável por esses números são os insumos, onde a produção das chapas de vidro representa cerca de 79% da pegada de carbono, atribuída ao uso intenso de energia e liberação de CO<sub>2</sub>, além das perdas e quebras do cotidiano (PARK; HENGEVOSS; WITTKOPF, 2018). Na pesquisa de Ludin *et al.* (2018), a fabricação dos substratos de vidro foi responsável pelo maior consumo de energia de toda ACV, levando o autor a sugerir a substituição do vidro por uma cobertura de polímero que reduziria a energia consumida em 150 MJ/m<sup>2</sup>.

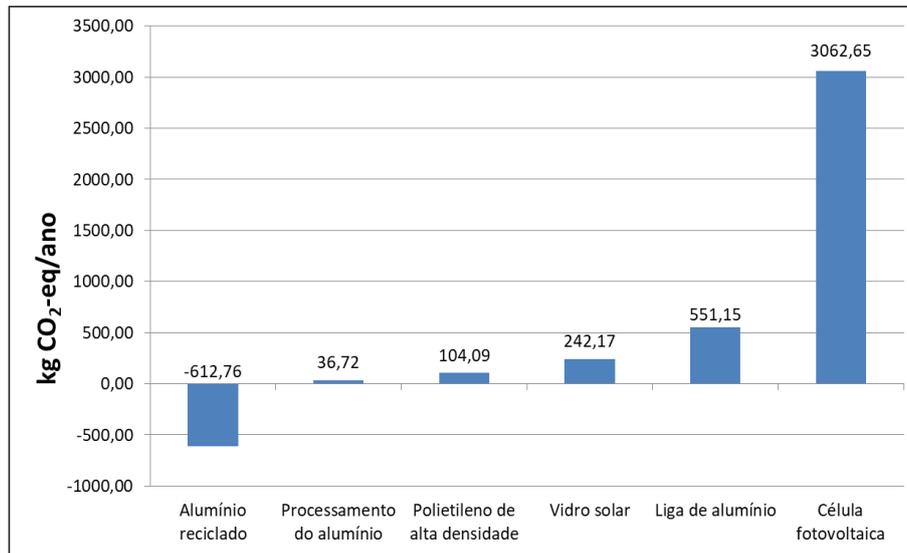
Os estudos de Hong *et al.* (2016) corroboram com os resultados encontrados, uma vez que os valores de CO<sub>2</sub>-eq obtidos nesse trabalho são majoritariamente oriundos da produção de células fotovoltaicas, seguido da extração e processamento do alumínio. Nos estudos do berço ao túmulo do alumínio, estima-se que a energia primária constitui a maior fonte de emissões de CO<sub>2</sub>, contabilizando, junto com as operações de mineração, 50% do total acumulado (CIACCI *et al.*, 2014).

A grande quantidade de alumínio utilizado nos sistemas aumenta significativamente a necessidade de energia, contribuindo entre 15% e 25% do consumo e promovendo a indicação de sua substituição ou redução na produção dos módulos. No caso dos módulos semitransparentes, a dispensa das molduras gera uma diminuição expressiva no consumo energético (LUDIN *et al.*, 2018).

Para atender a demanda de mercado, a indústria de processamento de alumínio passou por adaptações, substituindo o material primário (manufaturado) por secundário (reciclado). Na Itália, por exemplo, de 1947 a 2009, mais de 60% da produção nacional de alumínio foi proveniente de matéria-prima secundária (CIACCI *et al.*, 2014).

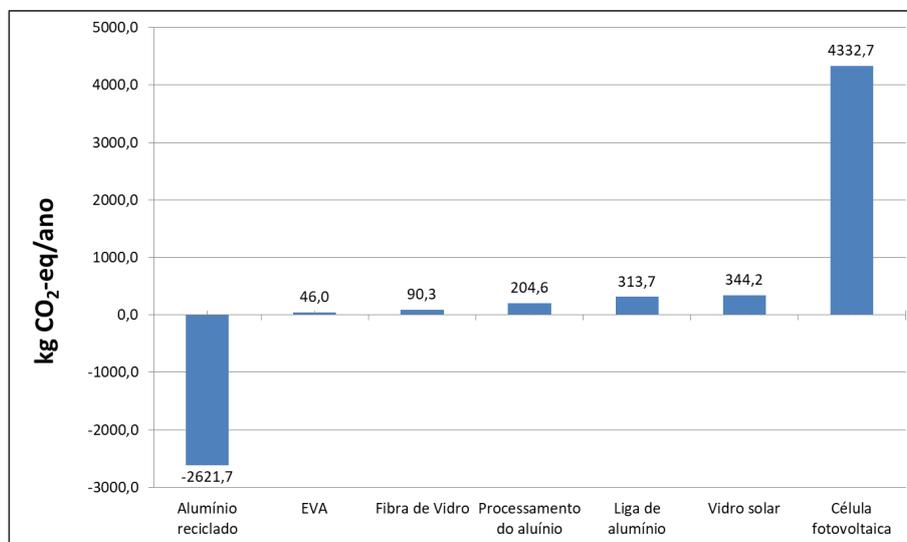
Com base nos resultados ilustrados nas Figuras 1 e 2, observa-se que a utilização de 85% de alumínio reciclado nas bases de fixação rendeu um abono

Figura 1 – Pegada de carbono por material constituinte do painel convencional



Fonte: Elaboração própria.

Figura 2 – Pegada de carbono por material constituinte do painel semitransparente



Fonte: Elaboração própria.

significativo na carga ambiental gerada, contribuindo para o melhoramento da eficiência energética. Dados apontam que a energia consumida por uma usina de processamento de alumínio virgem se compara à energia fornecida por uma unidade de usina nuclear (maior que 1 GW) (HONG *et al.*, 2016; CLUZEL *et al.*, 2010).

O efeito da abordagem de substituição total ou parcial de material primário por secundário pode ser avaliada a partir da comparação dos créditos ambientais. Essa metodologia é baseada na métrica da demanda acumulada de energia, onde o ganho marginal é dado pela diferença entre a energia usada

para reciclar o material e sua produção primária. No caso do alumínio, por exemplo, o valor da demanda acumulada de energia para o material virgem é de 194 mJ/kg, já a do reciclado é de 23,8 mJ/kg, resultando em um impacto líquido de -170,2 mJ/kg. Os valores negativos nas Figuras 1 e 2, referentes ao alumínio reciclado, representam um ganho ambiental (GALA; RAUGEI; FULLANA-I-PALMER, 2015).

A partir das simulações realizadas, atestou-se que, caso não houvesse a substituição dessa porcentagem da liga de alumínio por alumínio reciclado, os valores da pegada de carbono dos sistemas convencionais

e semitransparentes atingiriam 4.660 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano e 7.133 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano respectivamente, com acréscimos de 28,6% e 161,7%. Estes valores condizem com as discussões anteriores, em que a utilização de alumínio virgem aumenta consideravelmente o consumo de energia e, conseqüentemente, a pegada de carbono total, além da ausência do ganho ambiental equivalente. A quantidade de alumínio utilizada para o suporte do sistema semitransparente resultou em uma diferença colossal entre os valores de pegada de carbono, validando a importância da reciclagem desse metal (LUDIN *et al.*, 2018).

Os índices unitários de CO<sub>2</sub>-eq dos materiais restantes representam uma parcela pequena no contexto geral. Os impactos destes índices foram determinados como ínfimos, sem afetar significativamente os resultados; portanto, não foram aprofundados neste estudo. Entretanto, as emissões de gases de efeito estufa contribuem para o aquecimento global. Dessa forma, é recomendado sempre buscar por novos materiais e tecnologias que impactem cada vez menos o meio ambiente, pois esse ajuste na estrutura energética implica diretamente em um grande potencial de redução de emissões de carbono (DONG *et al.*, 2013).

## 5 Conclusão

A ACV é uma metodologia desenvolvida especialmente para avaliação dos impactos ambientais relacionados à fabricação ou utilização de algum produto ou serviço, realizada através do levantamento de dados em todas as fases do ciclo de vida do objeto de estudo. Os fluxos de matéria e energia, envolvidos na etapa de fabricação e posteriores, atingem o meio ambiente dos mais diversos modos, como é o caso das emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, a ACV permite avaliar quais os danos e/ou benefícios, de maneira quantitativa, promovendo melhorias aos processos produtivos.

Ao identificar a pegada de carbono de cada sistema fotovoltaico analisado, foi possível definir, numericamente, que o sistema semitransparente apresentou melhores valores quando comparado ao sistema convencional. Ou seja, o sistema semitransparente representa um menor impacto ambiental, viabilizado principalmente pelo uso de grande parte de alumínio reciclado em sua estrutura de fixação o qual gerou créditos de carbono relevantes ao ser avaliado seu ganho ambiental.

Diante disso, por meio dos resultados interpretados e discutidos, é perceptível que a contribuição quantitativa de emissões de gases de efeito estufa de ambos os sistemas é influenciada, principalmente, pelas células fotovoltaicas, vidro solar e o alumínio, desde a concepção destes materiais até o funcionamento dos painéis fotovoltaicos.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Bolsa de Produtividade em Pesquisa, nº 307394/2018-2 e 306783/2018-5, e Projeto Universal nº 401687/2016-3).

### REFERÊNCIAS

- BUENO, G.; HOYOS, D.; CAPELLÁN-PÉREZ, I. Evaluating the environmental performance of the high speed rail project in the Basque Country, Spain. **Research in Transportation Economics**, v. 62, p.44-56, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.02.004>.
- CARVALHO, M. *et al.* Carbon footprint associated with a mono-Si cell photovoltaic ceramic roof tile system. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 38, n. 4, p. 13120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.13120>.
- CIACCI, L.; ECKELMAN, M. J.; PASSARINI, F.; CHEN, W.; VASSURA, I.; MORSELLI, L. Historical evolution of greenhouse gas emissions from aluminum production at a country level. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 540-549, dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.062>.
- CLUZEL, F.; MILLET, D.; LEROY, Y.; YANNOU, B. Relative Contribution of a Subsystem to the Environmental Impact of a Complex System: application to aluminium electrolysis conversion substations. *In*: IDMME - VIRTUAL CONCEPT, 3., 2010, Bordeaux. **Proceedings** [...]. Bordeaux: Springer, 2010. p. 90-101.
- CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial Solar**: SunData v 3.0. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 22 nov. 2019.
- DONG, H. *et al.* Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment

approach. **Energy Policy**, v. 57, p.298-307, jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.057>.

ECOINVENT. **Database**. Versão 3.5. Cidade: Zurique 2018. Disponível em: <http://www.ecoinvent.ch>. Acesso em: 10 dez. 2019.

GALA, A. B.; RAUGEI, M.; FULLANA-I-PALMER, P. Introducing a new method for calculating the environmental credits of end-of-life material recovery in attributional LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 5, p. 645-654, 17 fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0861-3>.

GERBINET, S.; BELBOOM, S.; LÉONARD, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 747-753, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>.

HONG, J.; CHEN, W.; QI, C.; YE, L.; XU, C. Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. **Solar Energy**, v. 133, p. 283-293, ago. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.013>.

HUSAIN, A. A. F. *et al.* A review of transparent solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 779-791, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. New York, USA: Cambridge University Press, 2014.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. New York, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14000. Environmental Management System**. Geneva, Switzerland: International Standard Organization, 2006a.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework**. Geneva, Switzerland: International Standard Organization, 2006b.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment –**

**requirements and guidelines**. Geneva, Switzerland: International Standard Organization, 2006c.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E.; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, A. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 205, p. 110-259, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110259>.

LUDIN, N. A. *et al.* Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p.11-28, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>.

MAGRASSI, F. *et al.* Hybrid solar power system versus photovoltaic plant: A comparative analysis through a life cycle approach. **Renewable Energy**, v. 130, p. 290-304, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.072>.

MENOUFI, K.; CHEMISANA, D.; ROSELL, J. I. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme. **Applied Energy**, v. 111, p. 505-514, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.037>.

PARK, J.; HENGEVOSS, D.; WITTKOPF, S. Industrial Data-Based Life Cycle Assessment of Architecturally Integrated Glass-Glass Photovoltaics. **Buildings**, v. 9, n. 1, p. 8-26, 29 dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9010008>.

PARK, K. E.; KANG, G. H.; KIM, H. I.; YU, G. J.; KIM, J. T. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2681-2687, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.019>.

PEREZ, M. J. R.; FTHENAKIS, V.; KIM, H.; PEREIRA, A. O. Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 20, n. 8, p. 975-990, 9 jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.1167>.

PRÉ SUSTAINABILITY. **SimaPro software**. Versão 9.0.0.49. Cidade: Amersfoort, 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

QUEIROZ, A. R. *et al.* Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable**

**Energy**, v. 99, p. 379-389, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.022>.

ROYO, P.; FERREIRA, V. J.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials.

**Energy**, v. 101, p.174-189, abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.101>.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p.555-565, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>.

VARUN; BHAT, I. K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p.1067-1073, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>.

WHITAKER, M.; HEATH, G. A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. s1, p.553-572, abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00465.x>.

WILD-SCHOLTEN, M. J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 119, p.296-305, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037>.

WONG, P. W. *et al.* Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. **Renewable Energy**, v. 33, n. 5, p. 1024-1036, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.016>.

WU, P. *et al.* Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study. **Energy Procedia**, v. 105, p. 68-74, 2017. DOI: [tps://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.281](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.281).