

EMISSÕES DO CICLO DE VIDA DE CO₂, EMISSÕES EVITADAS E TEMPO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

CO₂ LIFECYCLE EMISSIONS, AVOIDED EMISSIONS, AND ENERGY PAYBACK TIME FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN BRAZIL

Larissa Ribeiro Guerreiro¹

Sérgio Almeida Pacca²

RESUMO: Sistemas fotovoltaicos, que convertem a energia solar em eletricidade, são uma alternativa para a redução das emissões de gases do efeito estufa. A instalação desses sistemas vem crescendo no mundo e no Brasil. Apesar de serem considerados livres de emissão durante a sua fase de operação, o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos libera CO₂. A fabricação dos módulos consome energia, que pode vir de fontes fósseis, e liberar CO₂, durante a combustão. Assim, a fim de determinar a real contribuição ambiental dos sistemas fotovoltaicos, avaliações do ciclo de vida (ACV) buscam calcular as emissões e o tempo de recuperação de energia dos sistemas instalados pelo mundo afora. Neste trabalho realizamos uma revisão da literatura de ACV de sistemas fotovoltaicos e buscamos harmonizar os valores de EPBT e emissões de CO₂ para sistemas instalados no Brasil, considerando a faixa de irradiação solar no território nacional. A disponibilidade de radiação solar no Brasil varia e afeta as emissões evitadas pela instalação de sistemas fotovoltaicos, que também dependem das emissões das tecnologias evitadas. Mesmo considerando estas variações e a média do fator de emissão da eletricidade da rede, as instalações fotovoltaicas no Brasil podem evitar de 346 a 366 g de CO₂ por kWh de energia gerada pelos sistemas. Já a mediana do tempo de recuperação de energia varia de 1,2 a 8,9 anos, para, respectivamente, os valores máximos e mínimos de irradiação.

2834

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Tempo de recuperação de energia. Emissões de CO₂.

ABSTRACT: Photovoltaic (PV) systems, which convert solar energy into electricity, are an alternative for reducing greenhouse gas emissions. The installation of these systems is growing worldwide and in Brazil, as well. Although they are considered emission-free during their operation phase, life cycle CO₂ emissions are of concern. Modules' manufacturing consumes energy, which might come from fossil fuels, and release CO₂ during combustion. Thus, to determine the real environmental contribution of photovoltaic systems, life cycle assessments (LCA) seek to calculate emissions and energy payback time (EPBT) of systems installed around the world. In this work, we carry out a review of the LCA literature for PV systems and harmonize the EPBT and CO₂ emission results for systems installed in Brazil, considering the range of solar radiation on the national territory. The availability of solar radiation in Brazil varies and affects the avoided emissions by PV systems, which also depends on the emissions of the installed technologies. Even considering these variations and the average grid electricity emission factor, photovoltaic installations in Brazil avoid 346 to 366 g of CO₂ per kWh of electricity generated by PV systems. The median energy payback time ranges from 1.2 to 8.9 years, according to the maximum and minimum irradiation values, respectively.

Keyword: Life Cycle Assessment. Payback Time Energy. CO₂ Emissions.

¹Gestora Ambiental - Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo. Mestranda em Sustentabilidade no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade - Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP).

²Professor no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade - Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP).

INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da população em todo o mundo e suas necessidades de conforto e estilo de vida atrelados ao uso de equipamentos eletroeletrônicos, tem acarretado todos os anos um significativo aumento no consumo de energia elétrica (OLIVEIRA; MARIO; PACHECO, 2021). No Brasil houve um aumento de 4,2% do consumo de energia elétrica em 2021, acarretando um aumento da oferta interna de energia que é disponibilizada para a população. Ao longo do ano de 2021, um período de escassez hídrica levou à queda dos níveis dos reservatórios das principais hidrelétricas, e, conseqüentemente, reduziu a oferta da eletricidade gerada por elas. Esse efeito acarretou mudanças para geração elétrica brasileira, que precisou ser compensada pelo aumento da participação da geração termelétrica, principalmente pela combustão do gás natural (EPE, 2022). Paralelamente a isso, a concepção já amadurecida de que o uso de fontes fósseis de energia, emissoras de CO₂, são prejudiciais para o meio ambiente, tem impulsionado a adoção de alternativas menos impactantes para suprir a demanda crescente por energia, bem como a substituição e redução das fontes de energia poluidoras.

Soluções para mitigar e reduzir emissões de CO₂ causadas pelo uso de fontes fósseis de energia tem despertado o interesse e a realização de estudos em todo o mundo, sobretudo, quando se leva em consideração o provável esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, e projeções de aumento no consumo de energia (DOS SANTOS CARSTENS; DA CUNHA, 2019). No caso do Brasil, estima-se que até 2030 o consumo de energia triplicará (FARIAS; MARTINS; CÂNDIDO, 2021). Nesse contexto, as energias renováveis assumem um papel importante no fornecimento de eletricidade, uma vez que seu uso reduz as emissões de CO₂ (SAIDI; OMRI, 2020). No Brasil, a oferta interna de energia renovável aumentou a uma taxa de 1,4% ao ano entre 2012 e 2021 (EPE 2022).

Dentre as energias renováveis, a energia solar fotovoltaica foi em 2021 a segunda fonte de energia com maior taxa de crescimento absoluto de geração (IEA, 2022). Isso se deve à queda de preços da energia fotovoltaica nos últimos anos, à robustez técnica dos projetos em operação há mais de 30 anos, ao grande potencial das tecnologias existentes e ao fato deles não emitirem gases de efeito estufa durante sua operação. Essa tendência mundial também se aplica ao Brasil, devido à sua localização geográfica, o país apresenta alta incidência de radiação solar (em comparação com países com mais instalações fotovoltaicas), que é

relativamente uniforme em todo o país, possibilitando o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos viáveis em diferentes regiões.

No Brasil, há uma expectativa de evolução da competitividade nos próximos anos devido à expansão significativa da geração solar fotovoltaica, atingindo de 27 a 90 GW de capacidade instalada e 8 a 26 GW médios em termos de energia em 2050, sinalizando a importância da sua ampliação na matriz elétrica (EPE, 2020). Espera-se que, até 2040, essa fonte de energia renovável seja a mais importante do planeta e que represente 10% da matriz energética do Brasil até 2030 (PEREIRA, 2019; DE ALMEIDA; DE ALMEIDA, 2022).

Assim a energia solar fotovoltaica pode contribuir com os compromissos nacionais de redução de emissão de gases de efeito estufa, como alternativa competitiva no fornecimento de energia, dada a redução nos seus custos (EPE, 2020).

Contudo, apesar dos sistemas fotovoltaicos serem considerados fontes de energia limpa e sustentável, ainda assim, eles podem causar potenciais impactos desde a fabricação até o descarte, que não devem ser ignorados, devido às emissões de gases poluentes durante o processo de fabricação dos módulos, impactos ambientais na área das instalações dos parques solares, substâncias tóxicas que podem poluir recursos hídricos e não atingir o tempo de recuperação de energia ao fim do ciclo de vida (TAWALBEH et al., 2021; TSUCHIYA; SWAI; GOTO, 2020). No entanto, mesmo com todos esses fatores ambientais relevantes a serem considerados, do ponto de vista ambiental, os impactos positivos pelo uso de sistemas fotovoltaicos ainda os tornam comparativamente vantajosos, em relação às fontes fósseis de energia (TAWALBEH et al., 2021).

Avanços no processo de fabricação e desenvolvimento de tecnologias, tanto de módulos fotovoltaicos desde a primeira geração (baseado em silício tradicional), até a terceira geração (baseado em novas estruturas de silício), tem barateado a produção de energia solar, bem como aumentado significativamente a sua vida útil, reduzindo o tempo de recuperação de energia (MUTERI et al., 2020; TAWALBEH et al., 2021). O tempo de recuperação de energia é uma razão entre a demanda acumulada de energia primária para a fabricação e instalação do sistema fotovoltaico, e a eletricidade gerada pelo sistema em um ano. O avanço alcançado no desempenho energético de módulos fotovoltaicos em seu ciclo de vida pode ser evidenciado ao observar que o tempo de recuperação de energia em meados de 1976 era de 40 anos, tendo evoluído significativamente para algo em torno de menos de 10 anos nas primeiras décadas do século XXI (YADAV; BAJPAI, 2020).

Nesse contexto, numerosos estudos têm evidenciado a expressiva melhoria de tempo de recuperação de energia face ao desempenho energético de sistemas fotovoltaicos. Acerca disso, Pacca, Sivaraman e Keoleian (2007) ao avaliar o desempenho energético e ambiental com base no tempo de recuperação de energia de sistemas fotovoltaicos, observaram valores entre 3,2 e 7,5 anos. Já Wong, Royapoor e Chan (2016), observaram um valor médio de tempo de recuperação de energia em torno de 3,52 e 2,33 anos para tecnologias de silício monocristalino e policristalino, respectivamente. O tempo de recuperação de energia dos sistemas fotovoltaicos depende da localização geográfica, sendo que sistemas fotovoltaicos produzidos na Europa e instalados no norte da Europa precisam de cerca de 1,1 ano para equilibrar a demanda acumulada de energia, enquanto os sistemas fotovoltaicos no sul da Europa igualam a demanda acumulada de energia após 0,9 anos, dependendo da tecnologia instalada e da eficiência da rede (FRAUNHOFER, 2022).

Contudo, como a principal motivação para a instalação de sistemas fotovoltaicos é a redução das emissões associadas com a geração de eletricidade, um resultado pertinente, nesse sentido, é o balanço de emissões, ou seja, a comparação entre as emissões do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos e as emissões da eletricidade deslocada por eles. As emissões de CO₂ dos sistemas fotovoltaicos variam devido a vários fatores, como: potencial solar, eficiência, taxa de desempenho do sistema, vida útil e tipo de instalação (Hicks e Grant 2020).

2837

A etapa de purificação do silício, para os módulos baseados neste material, demanda bastante energia e dependendo da composição da geração nos locais de produção, pode acarretar emissões de CO₂ expressivas. Não obstante, o uso de material para células de silício foi reduzido significativamente durante os últimos 16 anos de cerca de 16 g/Wp para menos de 2,5 g/Wp devido ao aumento da eficiência, wafers mais finos e corte com fio diamantado, bem como lingotes maiores (FRAUNHOFER, 2022). Este aumento de eficiência também implica em redução nas emissões do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos.

Resultados de avaliação do ciclo de vida (ACV) mostram que os sistemas fotovoltaicos liberam muito menos CO₂ por kWh do que a geração fóssil, mas as emissões de CO₂ dos sistemas variam devido à intensidade de carbono da energia utilizada na fabricação e eletricidade deslocada (Grant e Hicks 2020).

Nesse sentido, considerando a relevância dos sistemas fotovoltaicos na redução do uso dos combustíveis fósseis e na emissão de gases de efeito estufa, o presente artigo tem como intuito determinar o balanço de emissões de CO₂ e determinar o tempo de recuperação

da energia da instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, a partir da avaliação do ciclo de vida e dos valores de irradiação solar incidentes no país.

Materiais e Métodos

A avaliação foi baseada em uma revisão sistemática da literatura dos estudos de emissões de CO₂ do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos monocristalinos. A preferência por utilizar módulos monocristalinos deve-se ao fato desta tecnologia ser responsável por mais de 80% da produção mundial pela indústria fotovoltaica em 2021 (FRAUNHOFER, 2022).

A pesquisa bibliográfica foi realizada em diversas fontes: *Scopus*, *Google Scholar* e *ScienceDirect*, *SciELO*; e os termos de pesquisa utilizados para identificar os estudos foram os seguintes: photovoltaic OR Life Cycle Assessment (LCA) OR energy payback time (EPBT) OR CO₂ emissions solar OR monocrystalline.

Após a compilação dos dados, por meio da pesquisa bibliográfica, foi realizada uma análise quantitativa para mensurar e revelar uma faixa de distribuição dos valores, sendo que buscamos balizar a análise apresentada nesse artigo com a estatística descritiva. A pesquisa qualitativa foi delimitada por um recorte temporal, considerando as publicações, entre os anos de 2014 e 2021. Contudo, os estudos foram analisados para identificar a fonte de informação usada no inventário do ciclo de vida. Se os dados de inventário fazem referência a um estudo anterior, optamos por utilizar a referência com os dados primários.

Para obter resultados comparáveis, os seguintes critérios de seleção foram utilizados:

- Estudos que expressam quantitativamente as emissões de GEE em g de CO₂ equivalente por kWh;
- Estudos que incluem a avaliação do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos monocristalinos expressa em MJ/m², incluindo o limite do sistema berço ao portão da fábrica ou do berço ao túmulo.
- Estudos que incluam a irradiação solar do país, a eficiência e vida útil dos sistemas.³

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores para emissões do ciclo de vida de GEE, em g CO₂/kWh, a demanda acumulada de energia primária (MJp), e o ano de publicação para cada um dos sistemas fotovoltaicos analisados a partir da avaliação do ciclo de vida (ACV).

³ *Para estudos nos quais não continham determinadas informações, foram utilizados valores padronizados, como: 17% para a eficiência dos módulos monocristalinos (CSS, 2021); 30 anos para a vida útil do sistema (SAMPAIO et al., 2017) e para a irradiação solar foram utilizados valores do Global Atlas Solar (Solargis, 2022).

Tabela 1. Informações dos artigos selecionados para a análise

Autor	Ano	Irradiação	gCO ₂ /kWh	Demanda acumulada de energia (MJp/m ²)
KIM, et al.	2014	1.310	41,8	3.513
YUE, et al.	2014	1.700	37,3	3.800
YUE, et al.	2014	1.700	72,2	4.900
WYSS, et al.	2015	1.331	87,5	28.700
KABAKIAN et al.	2015	1.867	40,2	26.965
KABAKIAN et al.	2015	1.867	38,9	26.842
BELUSSI et al.	2015	1.300	54,7	4.627
BELUSSI et al.	2015	1.600	44,3	4.617
BELUSSI et al.	2015	1.900	39,9	4.932
AKINYELE, et al.	2017	1.493	37,3	3.800
AKINYELE, et al.	2017	2.223	72,2	8.700
FTHENAKIS, et al.	2017	1.700	29	2.900
MUSTAFA, et al.	2019	1.403	70,52	18.750
NORDIN, et al.	2020	1.561	70,04	4.670
NORDIN, et al.	2020	1.561	67,06	4.512
NORDIN, et al.	2020	1.561	64,69	4.387
FTHENAKIS, et al.	2021	1.000	40	1.900
FTHENAKIS, et al.	2021	1.700	23	1.900
FTHENAKIS, et al.	2021	2.300	17	1.900
SANTOYO	2021	1.694	69,1	5.421

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Coleta de dados

Para determinar as emissões dos sistemas fotovoltaicos no Brasil, foram consideradas as taxas de emissão do ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos de silício monocristalino de 17-87,5 g CO₂-eq./kWh, conforme apresentado na tabela 1.

De fato, embora as emissões do ciclo de vida abranjam uma faixa considerável de 9–250 gCO₂/kWh (de Wild-Scholten 2013; Kommalapati et al. 2017), estudos recentes, que refletem maior eficiência e melhorias na fabricação, encontram emissões de ciclo de vida menores, correspondendo a uma faixa de 18 a 60 gCO₂/kWh (Wetzel e Borchers 2015) e estimativas centrais de 80 gCO₂/kWh (Hou et al. 2016), 50 gCO₂/kWh (Nugent e Sovacool 2014) e 20 gCO₂/kWh.

A data de publicação do artigo não significa muito em relação à data de coleta dos dados e a data da tecnologia. Por exemplo, Kim et al. 2014, utiliza dados principalmente de coleta de campo, sendo incorporado dados da literatura quando necessário. Yue et al. 2014, utiliza dados de Inventário do Ciclo de Vida do Banco de Dados do Ciclo de Vida Chinês (CLCD) de 2013. Já o trabalho de Wyss et al. 2015, utiliza dados secundários de de Wild-Scholten, MJ (2014) que correspondem a sistemas do ano de 2011. Kabakian et al. 2015, utiliza dados do Ecoinvent v.2.2 além do Relatório Internacional de Energia Fotovoltaica de 2015 e Akinyele et al 2017, utiliza o mesmo relatório com dados de 2011.

Já o trabalho de Fthenakis, et al. 2017 utiliza dados publicados em Fthenakis et al. 2009. Mustafa et al. 2019, utiliza dados do Ecoinvent v3.3 complementando com Parisi et al. (2014) e Parisi et al. (2011), Nordin et al. 2020, utiliza dados do Relatório Internacional de Energia Fotovoltaica de 2015 para o inventário, além do Software OpenLCA 1.8 e o Ecoinvent. Por fim, Fthenakis et al. 2021, utiliza novamente dados de Wild-Scholten (2020), sendo dados mais atualizados, e Santoyo et al. 2021, utiliza o Ecoinvent.

Os cálculos de emissão do ciclo de vida e do tempo de recuperação da energia investida, consideram a irradiação solar do local para o qual o sistema é projetado. Assim, os dados retirados das referências bibliográficas (Tabela 1) foram adaptados considerando a faixa de irradiação no Brasil. Desse modo, foram utilizados a faixa de valores, segundo o Solargis (2019), de mínimo (1534 kWh/ano) e máximo (2264 kWh/ano).

A equação (1) apresenta o cálculo para harmonizar os valores considerando a irradiação no Brasil:

$$\frac{\text{Taxa de Emissões (g CO}_2\text{/kWh)} \times \text{Irradiação solar (kWh/m}^2\text{/ano)}}{\text{Irradiação solar mínima ou máxima do Brasil (kWh/m}^2\text{/ano)}} \quad (1)$$

Onde a Taxa de Emissões gCO_2/kWh e a Irradiação solar ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{ano}$) refere-se a dados encontrados pela pesquisa bibliográfica (Tabela 1); e a Irradiação solar do Brasil ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{ano}$).

Partindo desses dados é possível determinar o tempo de recuperação de energia dos sistemas fotovoltaicos no Brasil, combinando tal informação com o Fator de Emissão Brasileiro do sistema interligado nacional (SIN). Para determinar as emissões evitadas pela instalação de sistemas fotovoltaicos, foi utilizado o Fator de Emissão da eletricidade do sistema interligado para fins de projetos do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), baseado no método da análise de despacho do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, do ano de 2022. Esse método demonstra o crescimento das emissões de CO_2 da energia despachada na margem e das últimas usinas construídas (MCTI, 2022). Considerando o ano de 2022, foi encontrada uma faixa para o Fator de Emissão Brasileiro de 130,4 a 667,1 $\text{g CO}_2/\text{kWh}$.

Entre 2020 e 2021 o crescimento das termelétricas para geração de eletricidade teve um aumento de 24% na participação total, sendo 6,5% de usinas abastecidas com gás natural (EPE, 2022). Considerando que uma parcela significativa das novas termelétricas baseadas em combustíveis fósseis, convertem o gás natural em eletricidade, utilizamos o fator de emissão deste combustível e o fator de emissão do MDL para determinar a energia primária convertida em 1 kWh de eletricidade. O fator de emissão do gás natural é 15,3 kg de C por GJ ou 56,1 g de CO_2 por MJ (IPCC, 2006). Portanto, dividindo-se o fator de emissão do MDL pelo fator de emissão do gás natural, encontramos a energia primária convertida em eletricidade pelas termelétricas, que varia de 2,32 a 11,89 MJ primário (MJ_p) por MJ elétrico.

A energia para a produção dos módulos deve abranger e contabilizar toda a energia acumulada do berço ao túmulo, desde a energia necessária para extrair até montar, implantar e o final de vida do seu ciclo de vida (GESSERT, 2012). Contudo os resultados apresentados na literatura consideram a demanda acumulada de energia primária do berço à instalação do sistema. Portanto para calcular o tempo de recuperação de energia, foi utilizada a seguinte equação:

$$\frac{\text{Demanda acumulada de energia dos sistemas fotovoltaicos em MJp/m}^2/\text{ano}}{\text{Irradiação solar mín ou máx (kWh/ano)} \times \text{Eficiência (\%)} \times 2,32 \text{ ou } 11,39 \text{ MJ}} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante seu ciclo de vida, os sistemas fotovoltaicos, consomem energia e emitem GEE durante várias etapas, como no processo de fabricação das células solares, na montagem de módulos fotovoltaicos, produção do *balance of the system* (BOS)⁴, no transporte de materiais, na instalação fotovoltaica e nos sistemas de disposição final ou reciclagem. Neste caso é possível averiguar o desempenho ambiental de um sistema fotovoltaico, realizando uma avaliação do ciclo de vida, que é capaz de avaliar e analisar o uso de energia e seus impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida. E assim, utilizar duas métricas que são capazes de avaliar o desempenho ambiental dos sistemas, sendo elas: as taxas de emissão líquida de GEE e o tempo de recuperação de energia (PENG et al., 2013).

A taxa de emissão líquida compara as emissões evitadas, considerando o perfil de geração associado com a rede no local de instalação dos sistemas fotovoltaicos, e as emissões do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. Portanto, para determinar as emissões líquidas é necessário conhecer as emissões do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. Já o tempo de recuperação da energia determina o período necessário para recuperar a demanda de energia do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos.

O Tempo de recuperação de energia, é outro bom indicador, que pode ser vinculado a diversos impactos ambientais associados com a geração de eletricidade. Sendo que as emissões que não possuem relação ao uso de energia são encontradas apenas na produção de cimento, cal, aço e alumínio (para suportes e molduras) e na redução de sílica (para células solares de silício) (ALSEMA, 2012). Portanto, o cálculo do EPBT, aqui mencionado como tempo de recuperação de energia dos sistemas fotovoltaicos, depende da eficiência (%) dos módulos fotovoltaicos e da demanda cumulativa de energia para a sua fabricação (MJ/m²).

O cálculo para o tempo de recuperação de energia investida neste artigo foi adaptado utilizando a equação 2 já mencionada e a demanda acumulada de energia primária apresentada na Tabela 1.

Assim, a partir da pesquisa bibliográfica da avaliação do ciclo de vida de sistemas monocristalinos foram calculadas as emissões por grama de CO₂ e o tempo de recuperação de energia no Brasil a partir da equação (1) e (2), considerando os valores de irradiação

⁴ São as demais partes de um sistema fotovoltaico, excluindo os módulos, são definidas como os componentes de equilíbrio do sistema e incluem: inversores, controlador, cabos, baterias, entre outros (PENG, 2013).

máximo e mínimo, encontrados no território brasileiro. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Emissões de CO₂ e Tempo de recuperação de energia investida no Brasil a partir do cálculo com a irradiação solar do país

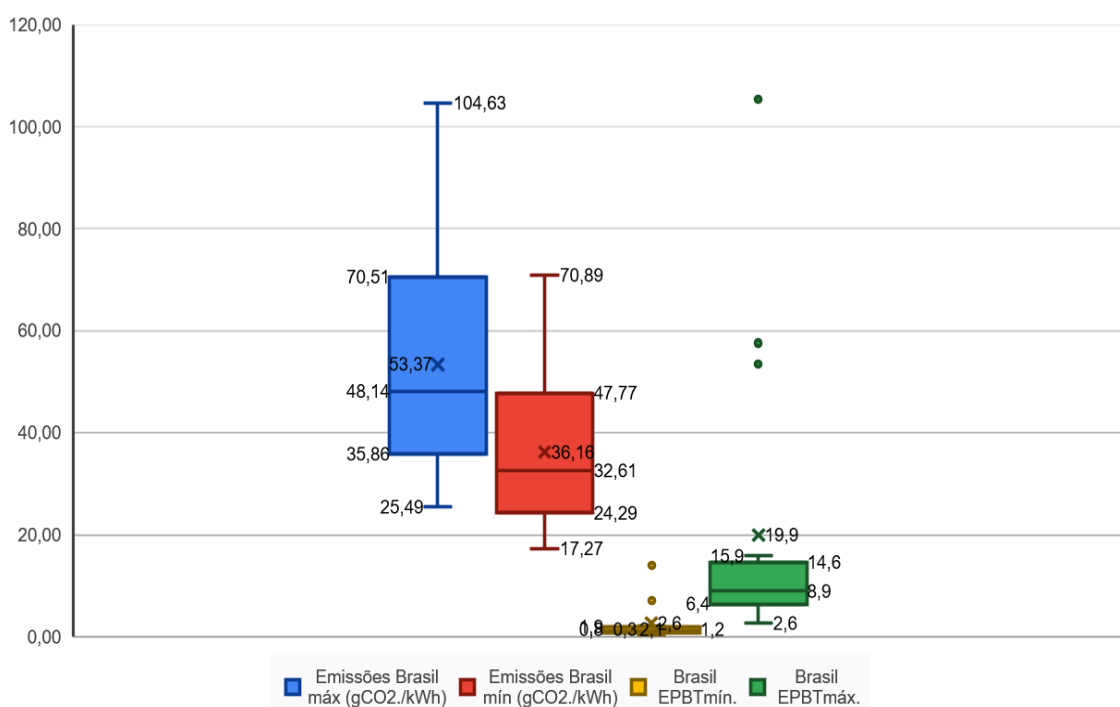
Autor	Ano	Emissões Brasil máx (gCO ₂ ./kWh)	Emissões Brasil mín (gCO ₂ ./kWh)	Brasil EPBT mín.	Brasil EPBT máx.
KIM, et al.	2014	35,71	24,19	0,8	6,2
YUE, et al.	2014	41,34	28,01	1,0	7,6
YUE, et al.	2014	80,01	54,21	1,3	9,8
WYSS, et al.	2015	75,92	51,44	7,1	53,4
KABAKIAN et al.	2015	48,93	33,15	7,6	57,8
KABAKIAN et al.	2015	47,34	32,08	7,6	57,6
BELUSSI et al.	2015	46,36	31,41	1,1	8,7
BELUSSI et al.	2015	46,21	31,31	1,1	8,6
BELUSSI et al.	2015	49,42	33,48	1,2	9,2
AKINYELE, et al.	2017	36,30	24,60	0,9	6,9
AKINYELE, et al.	2017	104,63	70,89	2,1	15,9
FTHENAKIS, et al.	2017	32,14	21,78	0,8	5,8
MUSTAFA, et al.	2019	64,49	43,70	13,9	105,4
NORDIN, et al.	2020	71,26	48,29	1,2	9,4
NORDIN, et al.	2020	68,23	46,23	1,2	9,1
NORDIN, et al.	2020	65,82	44,60	1,2	8,8
FTHENAKIS, et al.	2021	26,08	17,67	0,3	2,6
FTHENAKIS, et al.	2021	25,49	17,27	0,3	2,6
FTHENAKIS, et al.	2021	25,49	17,27	0,3	2,6
SANTOYO	2021	76,31	51,70	1,4	10,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para as emissões de CO₂ dos sistemas fotovoltaicos monocristalinos, foi encontrado um intervalo de faixa de emissões para o Brasil de 17,27-104,63 g CO₂/kWh. Deste modo, como a irradiação solar varia em diferentes regiões do mundo (SURI et al., 2020), é imprescindível analisar cada estudo com base em sua localização específica.

A figura 1 apresenta uma análise estatística dos resultados da tabela 2. A média das emissões foi de 53,37 g de CO₂/kWh para os valores mínimos de irradiação, a 36,16 g de CO₂/kWh para os valores máximos de irradiação no Brasil, sendo que a mediana e o desvio padrão em cada caso foi de, respectivamente 48,14; 4,83 e 32,61; 3,27.

Figura 1. Análise estatística do Brasil com base nas Emissões de CO₂ e no Tempo de recuperação de energia investida



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Considerando o valor mínimo do fator de emissão do sistema interligado nacional em 2022 (130,4 g de CO₂/kWh) e as médias, a instalação de sistemas fotovoltaicos poderia evitar as emissões de 77 g de CO₂/kWh. Já em locais onde a irradiação é maior, a instalação poderia evitar cerca de 94 g de CO₂/kWh. Contudo, se considerarmos a média do fator de emissão em 2022, os sistemas fotovoltaicos poderiam evitar de 345 a 366 g de CO₂/kWh.

Já, com relação ao tempo de recuperação da energia, considerando os locais com maior irradiação no Brasil, o EPBT seria de 2,6 anos e, para os locais com menos irradiação, o EPBT seria de 20,0 anos. A mediana e o desvio padrão para os locais com mais e menos irradiação são respectivamente 1,2 e 0,8 e 8,9 e 6 anos.

Sendo assim, os módulos fotovoltaicos cujos processos de produção e utilização são realizados de forma padronizada podem ser instalados em regiões com alta ou baixa intensidade de insolação. Quanto maior a radiação solar (em regiões tropicais e subtropicais), maior a energia produzida pelas células fotovoltaicas. Este fator tem um impacto direto no Tempo de Recuperação de Energia. (KLUGMANN-RADZIEMSKA, 2022).

É claro que valores maiores que 20 anos para um EBPT estão fora de alcance, pois a vida útil de um sistema fotovoltaico é de 25-30 anos, portanto, dados maiores que esses valores são questionáveis e possuem explicações, como: ano, irradiação, grande consumo de energia na sua produção, baixa eficiência do módulo.

A eficiência do módulo também é outro fator importante, segundo a *National Renewable Energy Laboratory* (2020), no ano de 2020, a célula de silício monocristalino apresentou uma eficiência de 26,1%. A eficiência da célula solar dos sistemas fotovoltaicos de silício depende - em última análise - da pureza do silício. No entanto, as vantagens de usar módulos de alto desempenho são parcialmente compensadas pelos maiores requisitos de energia da fase de produção (KLUGMANN-RADZIEMSKA, 2022). Pois eles exigem uma intensidade de energia muito maior, por seu custo energético de fabricação ser maior devido à alta pureza necessária para processar o material (SHARMA et al., 2015).

2845

Desse modo, quando comparados o tempo de recuperação de energia com a eficiência de cada módulo encontrado nos estudos, nota-se que uma maior eficiência tem como consequência um tempo de recuperação de energia do módulo menor. Isto é imprescindível para um investimento atrativo, pois quanto menor o tempo de recuperação de energia, mais o sistema tem vida útil livre sem precisar compensar a energia utilizada na sua produção. Ademais, a energia investida na fabricação do módulo impacta nessa análise; sendo que, hoje em dia, possuímos mais recursos, altas tecnologias e que os módulos fotovoltaicos mais modernos podem compensar a demanda acumulada de energia primária mais rapidamente.

CONCLUSÕES

Concluindo, mesmo considerando as emissões de CO₂ e a demanda de energia primária dos sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil, este estudo mostrou que a contribuição destes sistemas pode contribuir para a redução das emissões de GEE da eletricidade gerada no país. Além disso, o tempo de recuperação da energia investida também apresentou valores atraentes. A partir dos valores mínimos e máximos de irradiação no

Brasil e da média do fator de emissão da eletricidade do sistema interligado nacional (SIN), os sistemas fotovoltaicos no Brasil, instalados em 2022, puderam evitar de 346 a 366 g de CO₂ por kWh de energia gerada por eles. Já a mediana do tempo de recuperação de energia variou de 1,2 a 8,9 anos, para, respectivamente, os valores máximos e mínimos de irradiação e a energia primária deslocada, correspondente ao SIN em 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSEMA, E. (2012). **Energy Payback Time and CO₂ Emissions of PV Systems**. Practical Handbook of Photovoltaics, 1097-1117. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00037-4>

AKINYELE, D. O.; RAYUDU, R. K.; NAIR, N. K. C. Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. **Renewable Energy**, v. 101, p. 537-549, 2017.

DE ALMEIDA, Hermes Alves; DE ALMEIDA, Ednaldo de Ceita Vicente. Potencial da energia solar fotovoltaica no Semiárido nordestino. **Concilium**, v. 22, n. 2, p. 197-210, 2022.

DOS SANTOS CARSTENS, Danielle Denes; DA CUNHA, Sieglinde Kindl. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy policy**, v. 125, p. 396-404, 2019.

CSS [Centro de Sistemas Sustentáveis, Universidade de Michigan] 2021. "Ficha informativa sobre energia fotovoltaica." Bar. Nº CSS07-08. <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/photovoltaic-energy-factsheet>

DE WILD-SCHOLTEN, M.J., 2013: Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 119, 296-305, doi:10.1016/j.solmat.2013.08.037.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021, 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>.

_____. **Plano Nacional de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energias. Brasília, 2020. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>.

FARIAS, M. E. A. C; MARTINS, M. F; CÂNDIDO, G. A. Agenda 2030 e Energias Renováveis: sinergias e desafios para alcance do desenvolvimento sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e13101723867-e13101723867, 2021.

FRAUNHOFER - Institute for Solar Energy Systems, ISE. Photovoltaics Report. **Relatório Fotovoltaico**. Disponível

em:<<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>.

FTHENAKIS, Vasilis; RAUGEI, Marco. Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems. In: **The Performance of Photovoltaic (PV) Systems**. Woodhead Publishing, 2017. p. 209-232.

FTHENAKIS, Vasilis; LECCISI, Enrica. Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems: Life-cycle energy and environmental impact reduction trends. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 29, n. 10, p. 1068-1077, 2021..

GESSERT, T. A. (2012). Cadmium Telluride Photovoltaic Thin Film: CdTe. **Comprehensive Renewable Energy**, 1, 423-438. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00122-0>

GRANT, C.A. e HICKS, A. L. 2020: Effect of manufacturing and installation location on environmental impact payback time of solar power. *Clean Technol. Environ. Policy*, 22(1), 187-196, doi:10.1007/s10098-019-01776-z.

HOU, Guofu et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, v. 164, p. 882-890, 2016.

IEA (2022), *Solar PV*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv>, License: CC BY 4.0

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Disponível em:<<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>

2847

KOMMALAPATI, Raghava et al. Review of the life cycle greenhouse gas emissions from different photovoltaic and concentrating solar power electricity generation systems. **Energies**, v. 10, n. 3, p. 350, 2017.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa. The Environmental Benefits of Photovoltaic Systems: The Impact on the Environment in the Production of Photovoltaic Systems: With a Focus on Metal Recovery. 2020.

MCTI [Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação]. (2022). **Método da análise de despacho**. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html.

MUSTAFA, Nur Ifthitah et al. Environmental performance of window-integrated systems using dye-sensitised solar module technology in Malaysia. **Solar Energy**, v. 187, p. 379-392, 2019.

MUTERI, Vincenzo et al. Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. **Energies**, v. 13, n. 1, p. 252, 2020.

NORDIN, Atiqah Hamizah Mohd et al. Life-cycle assessment of residential-scale grid-connected photovoltaic system in Malaysia based on monocrystalline silicon modules. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, v. 11, n. 2, p. 677, 2020.

NUGENT, D. E SOVACOOOL, B.K. 2014: Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65(o), 229–244, doi:10.1016/j.enpol.2013.10.048.

OLIVEIRA, A. M; MARIO, M. C; PACHECO, M. T. T. Fontes renováveis de energia elétrica: evolução da oferta de energia fotovoltaica no Brasil até 2050. *Brazilian Applied Science Review*, v. 5, n. 1, p. 257-272, 2021.

PENG, Jinqing; LU, Lin; YANG, Hongxing. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 19, p. 255-274, 2013.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. Sorocaba, 2019. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista.

PACCA, S; SIVARAMAN, D; KEOLEIAN, G. A. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy*, v. 35, n. 6, p. 3316-3326, 2007.

SAIDI, K; OMRI, A. Reducing CO₂ emissions in OECD countries: Do renewable and nuclear energy matter?. *Progress in Nuclear Energy*, v. 126, p. 103425, 2020.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos; GONZÁLEZ, Mario Orestes Aguirre. Photovoltaic solar energy: conceptual framework. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 74, p. 590-601, jul. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117303076?via%3Dihub>.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>

2848

SANTOYO-CASTELAZO, E. et al. Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: A case study for Mexico. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, p. 128314, 2021.

SHARMA, S., JAIN, K.K. and SHARMA, A. (2015) Solar Cells: In Research and Applications—A Review. *Materials Sciences and Applications*, 6, 1145-1155. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2015.612113>

Solargis. 2022. Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/>. [Online]. Disponível em:<<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em: set/2022.

Solargis. 2019. Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/>. [Online]. Disponível em:<<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em: set/2022.

SURI, Marcel et al. Global photovoltaic power potential by country. 2020.

TAWALBEH, M. et al. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, v. 759, p. 143528, 2021.

TSUCHIYA, Y; SWAI, T. A; GOTO, F. Energy payback time analysis and return on investment of off-grid photovoltaic systems in rural areas of Tanzania. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 42, p. 100887, 2020.

WETZEL, T.; BORCHERS, S. 2015: Update of energy payback time and greenhouse gas emission data for crystalline silicon photovoltaic modules. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 23(10), 1429–1435, doi:10.1002/PIP.2548.

WONG, J. H.; ROYAPOOR, M; CHAN, C. W. Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 608-618, 2016.

YADAV, S. K; BAJPAI, U. Energy, economic and environmental performance of a solar rooftop photovoltaic system in India. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 39, n. 1, p. 51-66, 2020.