

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE

CAROLINA MÔNICA DOS SANTOS

SERGIO ALMEIDA PACCA

**Análise do Ciclo de Vida para sistemas fotovoltaicos: uma comparação entre instalação
de solo e de telhado**

São Paulo
2024

RESUMO

Pela localização geográfica do Brasil, o país se torna promissor para a geração de energia a partir de fontes renováveis. O uso de energia solar fotovoltaica tem crescido nos últimos anos e é esperado que cada vez mais haja incentivo para o uso dessa alternativa. Os módulos fotovoltaicos em sua maioria são de fabricação chinesa que possui como sua principal matriz energética fontes não renováveis de energia. Com o atual cenário de aquecimento global e sua perspectiva de agravamento, é interessante compreender o potencial de emissões de GEE relacionado a fabricação dos módulos e assim estudar possibilidades de redução da pegada de carbono dessa alternativa promissora de geração de energia. Este estudo tem como objetivo coletar dados de emissões durante todas as etapas desde a fabricação até o fim de vida dos módulos fotovoltaicos e comparar as emissões relacionadas à planta de instalação de solo com a de telhado. Os dados estão sendo coletados a partir de EPDs e acompanhamento das instalações das plantas, com unidade funcional definida como 1 kWh de eletricidade gerada como saída da planta solar fotovoltaica. Como resultados parciais obtivemos que as emissões dos módulos não são proporcionais à capacidade de geração de energia e é o processo desenvolvido por cada empresa que influencia na pegada de carbono. É esperado que ao final do estudo seja possível definir os principais processos responsáveis pelas emissões de GEE e sugerir maneiras para a redução.

Palavras-chave: Emissões de gases do efeito estufa. Energia solar. Pegada de carbono.

1 Introdução

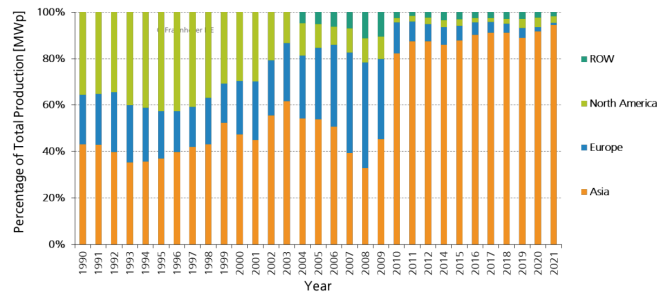
A busca por novas tecnologias, a expansão das fontes renováveis, os altos investimentos e os meios de otimização do uso de energia têm sido o caminho seguido pelos países para alcançar as promessas feitas no Acordo de Paris (Saccardo *et al.*, 2023). Esse acordo foi proposto na COP 21, 21ª conferência das partes, que aconteceu em Paris em 2015, com o objetivo de fortalecer as respostas dos países em relação ao aquecimento global. Foi determinado um limite de 2°C para o aumento da temperatura global e a meta era não extrapolar 1,5°C. Foram 196 países que assinaram concordando com o acordo e se responsabilizando em alcançar as metas prometidas para evitar o agravamento do aquecimento global, sendo que o Brasil está na lista desses países (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, 2023).

As estratégias para a redução das emissões são diversas, mas a matriz energética utilizada interfere diretamente na pegada de carbono dos países e o avanço contínuo no uso de energia elétrica é um tema que vem sendo discutido ao redor do mundo (Lima *et al.*, 2020). Esse aumento é consequência do crescimento populacional, desenvolvimento industrial, aumento dos níveis de conforto e maior tempo de permanência residencial (Fossati *et al.*, 2016). Segundo o Relatório de 2022 da Agência Internacional de Energia (IEA, 2022) a emissão de dióxido de carbono (CO₂) relacionada à produção de energia em 2021 foi recorde de 36.6 Gt. A tendência dos níveis de demanda energética continuarem crescendo proporciona uma preocupação com a consequente elevação de emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera (Jakučionytė-Skodienė; Liobikienė, 2023).

Os altos níveis de irradiação solar, correntes de vento presentes em diversas regiões e a disponibilidade de produção de biomassa somados, tornam o Brasil um país com excelente potencial para a geração de energia através de fontes renováveis (Ferreira, *et al.*, 2023). Um estudo desenvolvido por Chen *et al.* (2022), modelou dados de 97 países e concluiu que a relação entre fontes renováveis e emissões de CO₂ só será efetivamente positiva se o uso das fontes renováveis forem responsáveis pela produção energética de todos os países. Segundo o relatório desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer para Sistemas Fotovoltaicos (2023), a produção dos módulos ao longo dos anos tem crescido nos países da Ásia, principalmente na China (Figura 1). A pesquisa de Khezri *et al.*, demonstra que a complexidade econômica dos países da Ásia é um fator determinante para as emissões de CO₂ proveniente da geração de energia renovável. Para expandir o uso das energias renováveis é interessante entender seu potencial de emissão de GEE e estudar melhores maneiras de reduzir ao máximo seus impactos ambientais (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2023).

Figura 1 - Produção de módulos fotovoltaicos por região 1990-2021. Porcentagem do total de MWp produzido.

PV Module Production by Region 1990-2021
Percentage of Total MWp Produced

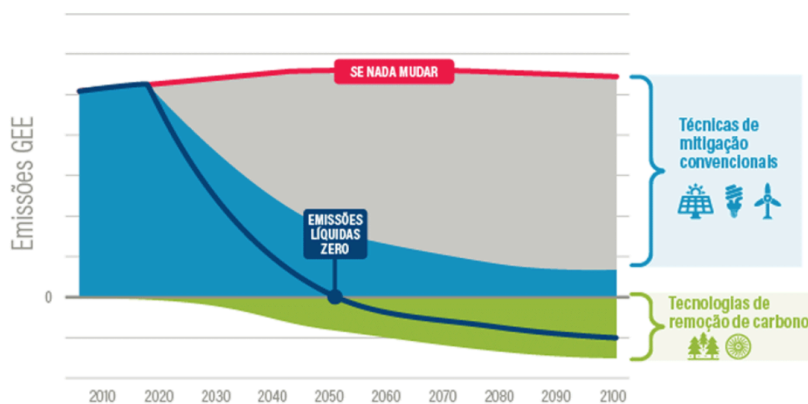


Fonte: 2023 PHOTOVOLTAICS REPORT Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

Uma ferramenta amplamente conhecida e utilizada na Ecologia Industrial para cálculo de impactos ambientais é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ela tem o intuito de rastrear durante o ciclo de vida de um material, produto, processo ou sistema suas implicações ambientais (Graedel; Allenby, 1995). Essa ferramenta possibilita quantificar as emissões de GEE e poluentes durante todas as etapas do ciclo: uso, extração e transporte de matéria prima; Fabricação, instalação e uso do produto; Processamento de resíduos (Thomas *et al.*, 1995). O uso da ACV pode ser de grande contribuição para entender como o Brasil com seu enorme potencial para fontes renováveis de energia pode avançar nas reduções líquidas de emissões de GEE e quais os melhores caminhos a serem seguidos.

Segundo Kabir *et. al.* (2024) reduções líquidas é um termo utilizado para demonstrar a diferença entre o que é produzido, gerado ou emitido em relação ao que está sendo armazenado, utilizado ou aprisionado. Em relação às emissões de GEE a figura abaixo (Figura 2) demonstra um dos caminhos para a transição energética de baixo carbono. Na imagem é possível perceber a importância das fontes renováveis para a redução das emissões de GEE, o rastreamento e redução das emissões relacionadas a qualquer etapa do uso dessas fontes é extremamente necessário para efetivar a diminuição da pegada de carbono.

Figura 2 - Utilização de técnicas de mitigação convencionais em conjunto com tecnologias de remoção de carbono para alcançar emissões líquidas zero de GEE.



Fonte: WRI - World Resources Institute Brasil, 2019.

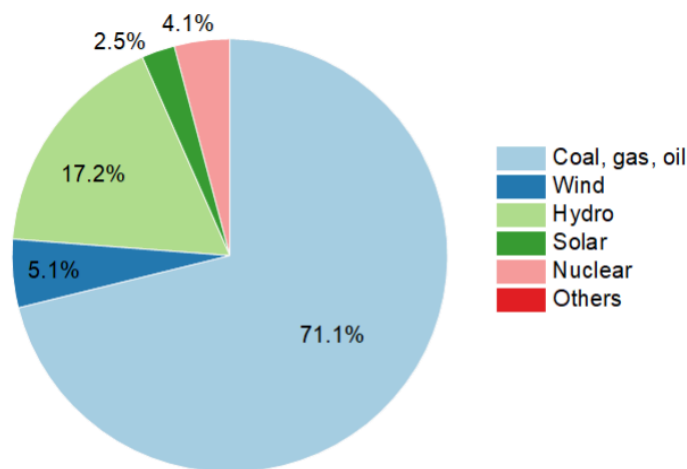
2 Revisão de Literatura

2.1 ACV para sistema fotovoltaico

Por ser conhecida como fonte de energia renovável e limpa, a utilização de sistemas fotovoltaicos tem crescido rapidamente durante os últimos anos e especialmente por essa fama o estudo de emissões relacionadas a todo processo desses sistemas é necessário (Sumper *et al.*, 2011). Segundo Gerbinet *et al.* (2014) os primeiros estudos sobre ACV aplicadas para quantificar impacto de módulos fotovoltaicos foram publicados na década de 70 e desde então em conjunto com os avanços tecnológicos dos módulos os estudos foram evoluindo. Sempre existirá a necessidade de estudos sobre ACV aplicadas a sistemas fotovoltaicos pois com o passar dos anos é esperado que as emissões fiquem cada vez menores devido ao aumento de eficiência.

Com a maioria dos módulos sendo fabricados na China, que tem como principal fonte de energia, para geração de eletricidade, o carvão, óleo e gás (Figura 3), para poder comparar a energia solar de forma justa com outras fontes de energia, principalmente as não renováveis, de acordo com a fronteira do sistema é possível levar em consideração todos os detalhes como a extração de matéria prima, produção, transporte, instalação, uso e descarte de resíduos relacionados aos sistemas fotovoltaicos (Sherwani *et al.*, 2010).

Figura 3 - Produção de eletricidade da China-2018



Fonte: 2019 China Energy Statistical Yearbook

Estudo desenvolvido por Khan *et al.*, (2024) conclui que a matriz energética do local de produção dos módulos, ano de coleta de dados, vida útil e instalação da planta fotovoltaica interferem diretamente no resultado das emissões de GEE totais. Outro estudo de Roy e Pearce (2024) compara por meio de ACV sistemas instalados em telhados com instalados no solo em diferentes estados dos Estados Unidos e conclui que o tempo de retorno de emissões é significativamente maior para sistemas montados no solo.

2.2. Balance of System (BOS)

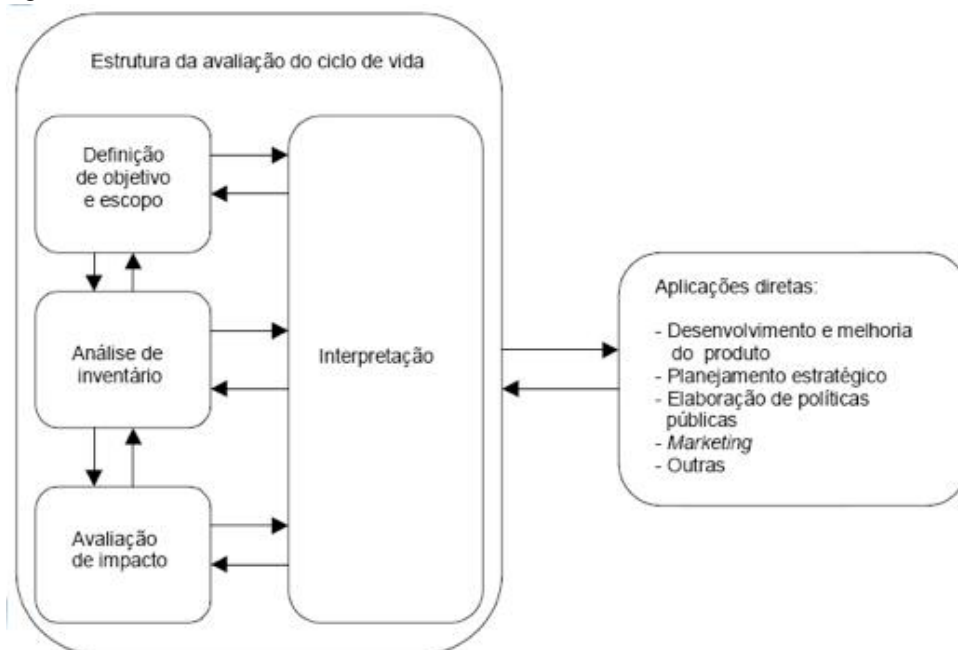
O BOS é o termo utilizado para descrever todos os componentes além dos módulos fotovoltaicos que são necessários para o funcionamento do sistema. Os elementos que fazem parte do BOS são fiação, inversores, baterias, controladores de carga, interruptores etc (Dhere, 2005).

Estudo de Dale e Benson (2013) aponta que em projetos fotovoltaicos, uma parcela significativa de investimento é necessária para a fabricação dos componentes BOS mas que o investimento não é proporcional ao gasto energético que é significativamente maior para a extração de matéria prima. Outro estudo de Alsema e Wild-scholten (2006), mostra que em relação ao tempo de retorno de energia para o BOS é muito inferior ao tempo de retorno para os módulos fotovoltaicos.

2.3 Estrutura da ACV

Segundo a Norma ABNT ISO 14040 (2009) a estrutura da ACV pode ser dividida em quatro partes (Figura 4). A primeira parte é o escopo e objetivo que tem como papel definir a unidade funcional, sistema de produto e fronteira do sistema de acordo com o objetivo do desenvolvimento da ACV.

Figura 4 - Estrutura ACV



Fonte: ABNT ISO 14040, 2009.

A segunda parte é a análise do inventário do ciclo de vida (ICV), que consiste na coleta e organização dos dados de entrada e saída de materiais e energia no ciclo de vida dos produtos. Essa fase é de extrema importância pois os dados utilizados são a chave para que os resultados sejam os mais realistas possíveis. Para que haja credibilidade na ACV além da confiabilidade dos dados é importante um detalhamento, para que a ACV seja considerada holística.

A terceira parte é a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), é nessa etapa em que os dados do ICV são calculados em conjunto com a categoria de impacto para que os resultados sejam de acordo com o impacto ambiental que foi definido como objetivo da ACV.

A quarta etapa permeia todas as anteriores pois é a interpretação, que deve ocorrer constantemente durante o processo. Assim existe a possibilidade de avaliar os dados e concluir melhorias no produto, processo, material ou sistema que está sendo discutido na ACV.

2.3.1 Escopo e Objetivo

2.3.1.1 Unidade Funcional

Um importante elemento da ACV é a unidade funcional que tem por finalidade normalizar e facilitar o entendimento dos resultados finais por categoria de impacto. Segundo a definição da Norma ABNT ISO 14040 (2009) a unidade funcional é o desempenho quantificado em unidade de referência.

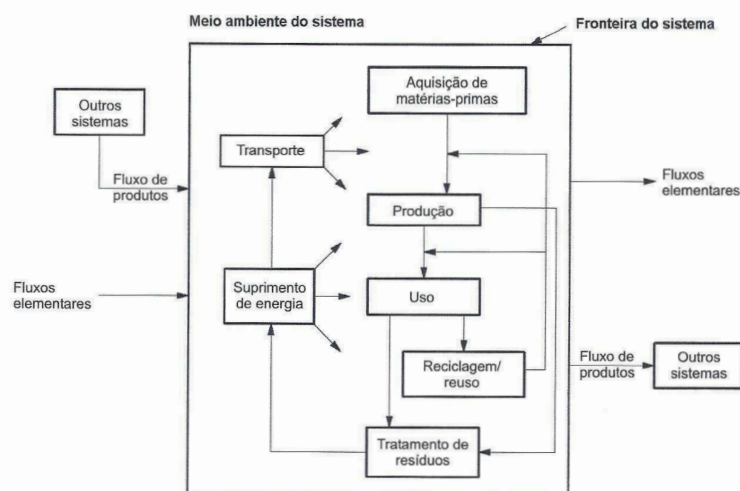
Em *Product Category Rules* (PCR) específico para módulos fotovoltaicos desenvolvido pela EDPIItaly (2020) a unidade funcional para sistemas fotovoltaicos foi definida como 1 kWh de eletricidade gerada como saída da planta solar fotovoltaica, portanto o impacto ambiental desses sistemas deve ser sempre de acordo com a unidade declarada. Esta unidade, baseada na geração de energia pelo sistema fotovoltaico, está diretamente relacionada com a disponibilidade local de irradiação.

2.3.1.2. Sistema de Produto e Fronteira do Sistema

O sistema de produto modela a ACV com os processos elementares e seus fluxos que desempenham importante papel no ciclo de vida dos produtos (ISO 14044, 2009).

A fronteira do sistema pode ser descrita como os critérios para seleção de etapas que fazem parte ou deixam de fazer parte do sistema de produto da ACV (Figura 5). A partir dela é possível verificar os processos que estão sendo investigados na ACV, todas as etapas que ficarem de fora da fronteira do sistema devem ser justificadas por motivos relevantes (ISO 14040, 2009). Diferentes PCRs descrevem as fases do sistema de produto de maneiras distintas.

Figura 5 - Modelo genérico de um Sistema de Produto com Fronteira de Sistema definida



Fonte: ABNT ISO (2009)

Segundo o PCR da EDPIItaly (2020) a fronteira do sistema pode ser dividida em 3 principais segmentos: montante, essencial e a jusante.

No segmento montante consta os processos de extracção de matéria prima e transporte da mesma em conjunto com todas as suas complicações - produtos semi-acabados e resíduos da extracção.

No segmento essencial as fases podem ser divididas em dois grupos, processos essenciais e infraestrutura essencial. No primeiro é levado em consideração o uso e operação dos módulos fotovoltaicos e no segundo a instalação da estrutura e todos os materiais necessários.

O último segmento, jusante, representa o fim da vida dos módulos com processamento de resíduos e disposição final.

A EN50693 (European Standard, 2019) é um PCR para produtos e sistemas elétricos e eletrônicos, ela descreve as fases da fronteira do sistema em: estágio de fabricação, distribuição, instalação, uso, desinstalação, fim do ciclo de vida e benefícios além da fronteira do sistema.

Outra estrutura de fronteira de sistema utilizada é com base na EN15804 (2019), também um PCR, mas esse define padrão de sustentabilidade para obras e serviços. A fronteira de sistema nesse PCR tem os processos separados de maneira mais minuciosa, eles são: fornecimento de matéria-prima, transporte (para o fabricante), fabricação, transporte, construção/instalação, uso, manutenção, reparo, substituição, remodelação, uso operacional de energia, uso operacional de água, desinstalação, transporte (para o processamento de resíduos), processamento de resíduos, disposição final, distribuição de eletricidade para a rede e reciclagem de materiais.

Figura 6 - Sistema do Produto de acordo com diferentes PCRs

Sistema do produto (EDPIItaly)	Sistema do produto (EN50693)	Sistema do produto (EN15804)	
Montante	Fabricação	A1	Matéria prima
		A2	Transporte da matéria prima
		A3	Manufatura
Essencial	Distribuição	A4	Distribuição
	Instalação	A5	Instalação
		Uso	B1
	B2		Manutenção
	B3		Substituição
	B4		Reparos
	B5		Remodelação
	B6		Uso operacional de energia
	B7	Uso operacional de água	
	Desinstalação	C1	Desconstrução
Jusante	Fim de vida	C2	Transporte de resíduo
		C3	Processamento de resíduo
		C4	Disposição final
			Distribuição de eletricidade para a rede
	benefícios além da fronteira do sistema	D	Reciclagem

Fonte: Adaptado de Environmental Product Declaration, CSI Solar Co., Ltd.

2.3.2 Inventário de Ciclo de Vida

De acordo com a Norma ABNT ISO 14040 (2009) a análise de inventário do ciclo de vida é a etapa onde os dados de entrada e saída serão quantificados e compilados na ACV seguindo o sistema de produto. A qualidade dos dados é um fator determinante e por isso a coleta deles e as fontes precisam estar muito bem alinhadas com o objetivo da ACV.

Para cada processo interno na fronteira do sistema são necessários dados que podem ser medidos, calculados ou estimados, desde que justificados. Quanto mais detalhado e minucioso for o inventário de ciclo de vida as entradas e saídas de cada processo serão mais realistas (ISO 14044, 2009).

Em estudo desenvolvido por Roy e Pearce (2024) que compara os impactos gerados por módulos instalados em telhados e grandes usinas solares, teve como inventário de ciclo de vida dados do relatório da Agência Internacional de Energia. Já no estudo de Khan *et al.*, (2024) o inventário foi feito com base em outros estudos. Portanto, de acordo com o tipo de ACV que está sendo desenvolvida e seu objetivo, a seleção dos dados pode ocorrer de diferentes maneiras.

2.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

2.3.3.1 Categoria de Impacto

A categoria de impacto é responsável por associar numericamente os resultados da ACV com diferentes consequências ambientais. O estudo de Roy e Pearce (2024) utiliza como indicadores o tempo de retorno de energia e CO₂ e a pegada hídrica. A escolha da categoria de impacto deve ser alinhada aos objetivos da ACV e de acordo com as relevantes consequências ambientais relacionadas a um processo ou produto.

Segundo Muteri *et al.*, (2020) que fez uma revisão sobre ACV para módulos fotovoltaicos, os estudos utilizam em sua maioria a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e o potencial de aquecimento global (GWP - Global Warming Potential), mas outros indicadores de impacto também são comuns como potencial de acidificação, eutrofização, formação de ozônio troposférico e depleção de ozônio estratosférico.

3 Métodos

A pegada de carbono será estimada combinando informações da literatura e dados coletados durante a instalação de sistemas fotovoltaicos. Um desses projetos será uma instalação na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH - USP) e a outra será uma instalação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI - USP).

3.1. Planta EACH - USP

O projeto será implementado no estacionamento da EACH - USP, sua estrutura é do tipo carport (Figura 7), BIPV (Painéis Solares Integrados à Construção). O relatório prevê potência CC mínima de 367 kWp, com 936 módulos fotovoltaicos bifaciais (Heliene), transformador de distribuição tipo pedestal (PAD-Mounted) de 300 kVA e dois inversores solares trifásicos de 150 kW cada.

Figura 7 - Projeto 3D do carport do estacionamento da EACH USP



Fonte: Vídeo Projeto 3D - IEE USP - EACH USP

3.2. Planta POLI - USP

O projeto foi implementado no telhado da Escola Politécnica, sua estrutura conta com 496 módulos instalados, potência nominal de 290kWp (Figura 8) e quatro inversores solares de 240kW cada.

Figura 8 - Projeto instalado na POLI - USP



Fonte: Autoria própria

3.3 Inventário de Ciclo de Vida

Este trabalho tem a intenção de calcular e comparar resultados de pegada de carbono das instalações fotovoltaicas, portanto estamos buscando em todas as etapas que os resultados tenham a mesma unidade funcional e a mesma categoria de impacto (mudança climática), resultando em kg CO₂ eq/kWh.

3.3.1 Inventário para a fase de fabricação dos Módulos Fotovoltaicos

Foi desenvolvido uma coleta de dados com base em EPDs de módulos fotovoltaicos de diferentes marcas. As informações analisadas foram: organização das células, tamanho da célula, dimensão, eficiência, potência e local de fabricação. Todos os EDPs selecionados têm fronteira do sistema do berço-ao-túmulo, unidade funcional definida como 1 kWh de eletricidade gerada como saída da planta solar fotovoltaica, fabricação na China e foram desenvolvidos com o software SimaPro e base de dados Ecoinvent.

O cálculo da pegada de carbono de módulos fotovoltaicos segundo o PCR desenvolvido pela EDPIItaly (2020) se inicia com a equação de energia total da planta fotovoltaica (equação 1):

$$E_{tot} = E_{ano} \cdot VU \quad (1)$$

Onde E_{tot} é a energia total produzida durante a vida útil do módulo em kWh e E_{ano} é referente a energia total produzida durante um ano de funcionamento da planta e o VU é o tempo de vida útil dos módulos.

Levando em consideração a vida útil dos módulos como 30 anos é possível utilizar o valor de degradação dos módulos para alcançar uma estimativa realista sobre a quantidade de energia gerada ao longo do ciclo de vida da planta (equação 2):

$$E_{vU} = E_1 \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^{vU-1} (1 - deg)^n\right) \quad (2)$$

Onde E_{vU} é a energia total gerada levando em consideração a vida útil e degradação dos módulos, E_1 é a energia gerada no primeiro ano da planta, n é o ano de operação dos módulos ($1 \leq n \leq 30$) e deg é a degradação dos módulos por ano (0,45%).

Para o cálculo da pegada de carbono ao longo dos anos, a equação utilizada é (equação 3):

$$C = E_{vU} \cdot c \quad (3)$$

Onde C é a pegada de carbono e c é o fator de emissão de carbono do ciclo de vida por unidade de geração de eletricidade (kg CO2 eq/kWh).

Com base nos dados coletados será possível comparar os diferentes módulos dos EPDs com os módulos fotovoltaicos que serão instalados na planta EACH-USP e na planta POLI - USP. Utilizando um módulo compatível os dados da fase montante serão realistas e aplicáveis ao desenvolvimento da ACV das plantas.

3.3.2 Inventário para a fase de instalação

A coleta dos dados de transporte até o lugar de instalação, materiais de instalação, embalagem dos materiais, quantidade de mão de obra, transporte de mão de obra entre outros detalhes está sendo realizada pelo acompanhamento da instalação das duas plantas fotovoltaicas. Cada material utilizado na instalação está sendo pesado e mapeado de acordo com a matéria prima presente nele.

Para o desenvolvimento da ACV com base nos dados coletados no acompanhamento da instalação serão utilizados as informações do Ecoinvent 3.8, que é uma ampla biblioteca global que fornece dados para o inventário de ciclo de vida sobre os impactos ambientais de vários produtos e serviços.

Para cálculo com os dados relacionados a transporte será utilizada a seguinte equação (equação 4):

$$C = D \cdot d \cdot f \quad (4)$$

Onde D é a distância de deslocamento, d é o desempenho do veículo (km/L) e f é o fator de emissão de acordo com o combustível utilizado para esse deslocamento (kg CO2 eq/L) segundo dados do Ecoinvent.

Para cálculo com os dados relacionados aos diferentes materiais será utilizada a seguinte equação (equação 5):

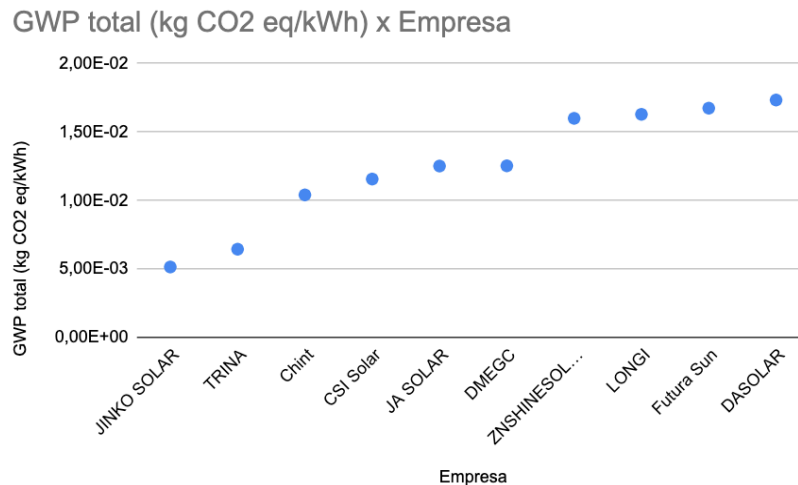
$$C = M \cdot e \quad (5)$$

Onde M é a massa do material e e é o fator de emissão de acordo com o tipo de material utilizado (kg CO2 eq/kg).

4 Resultados

De acordo com os dados levantados dos EPDs obtivemos como resultado a influência da fabricação de diferentes empresas em relação a emissão dos módulos. O gráfico abaixo (Figura 9) foi desenvolvido a partir da média de emissão dos modelos de módulos de cada empresa, com base nele podemos entender que existem maiores níveis de emissão da empresa Longi, DasSolar e Futura Sun. Quando essas empresas são comparadas com as que representam os menores valores de emissão (Jinko e Trina) é possível perceber que a ordem de grandeza é maior.

Figura 9 - Empresas x GWP total da fase de fabricação

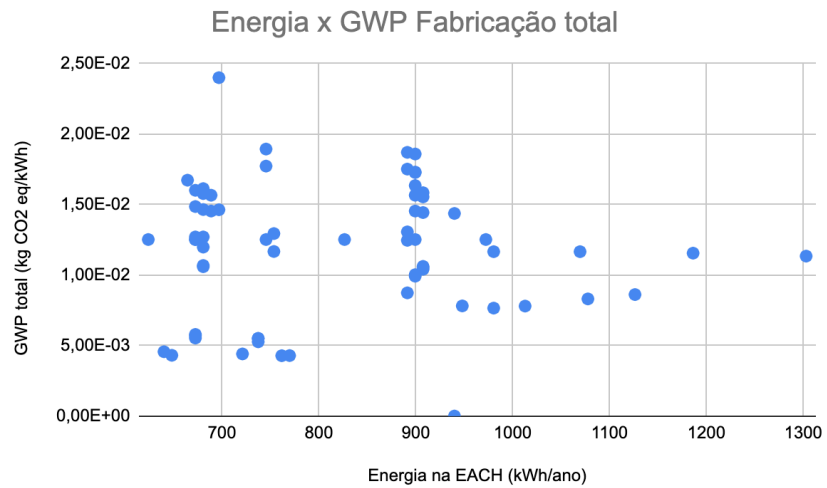


Fonte: Dados extraídos de PCR de cada módulo

É importante salientar que para cada empresa foi encontrado EPDs com diferentes quantidades de modelos de módulos, sendo que a Longi foi a empresa que teve maior quantidade de modelos no estudo com 16 analisados e a Futura Sun a com menor quantidade, com apenas um modelo analisado.

Outro resultado obtido pela análise dos dados retirados dos EPDs é o gráfico de comparação da capacidade energética de cada módulo por ano (kWh/ano) com as emissões estimadas para a fabricação deles (kg CO2 eq/kWh) (Figura 10).

Figura 10 - Energia x GWP total da fase de fabricação



Fonte: Dados extraídos de PCR de cada módulo

Com o gráfico podemos perceber que as emissões não são proporcionais à capacidade de gerar energia dos módulos, a pegada de carbono de cada módulo está muito relacionada à empresa de fabricação deles e os métodos utilizados por ela.

Referências

- ABNT. **NBR ISO 14040** Gestão Ambiental :Avaliação do Ciclo de Vida-Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. NBR ISO 14044 Gestão Ambiental :Avaliação do Ciclo de Vida-Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- ALSEMA, Erik A.; DE WILD-SCHOLTEN, Mariska J. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. *In: Materials Research Society Symposium Proceedings*. Warrendale, Pa.; Materials Research Society; 1999, 2006. p. 73.
- BALSALOBRE-LORENTE, Daniel et al. The influence of economic complexity processes and renewable energy on CO2 emissions of BRICS. What about industry 4.0?. *Resources Policy*, v. 82, p. 103547, 2023.
- CHEN, Chaoyi; PINAR, Mehmet; STENGOS, Thanasis. Renewable energy and CO2 emissions: New evidence with the panel threshold model. *Renewable Energy*, v. 194, p. 117-128, 2022.
- DALE, Michael; BENSON, Sally M. Energy balance of the global photovoltaic (PV) industry-is the PV industry a net electricity producer?. *Environmental science & technology*, v. 47, n. 7, p. 3482-3489, 2013.
- DHERE, Neelkanth G. Reliability of PV modules and balance-of-system components. In: *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005*. IEEE, 2005. p. 1570-1576.
- EN 50693 Product category rules for life cycle assessments of electronic and electrical products and systems, 2019.
- EN 15804:2012+A2 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2019.
- Environmental Product Declaration, CSI Solar Co., Ltd., 2022.
- FERREIRA, Miguel Marques et al. A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. *Renewable Energy*, v. 217, p. 119182, 2023.
- FOSSATI, Michele et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 1216-1231, 2016.
- GERBINET, Saïcha; BELBOOM, Sandra; LÉONARD, Angélique. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 747-753, 2014.
- GRAEDEL, Thomas E.; ALLENBY, B. R. Matrix approaches to abridged life cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, v. 29, n. 3, p. 134A-139A, 1995.
- IEA. World energy outlook 2022. Paris: IEA, 2022.

JAKUČIONYTĖ-SKODIENĖ, Miglė; LIOBIKIENĖ, Genovaitė. Changes in energy consumption and CO2 emissions in the Lithuanian household sector caused by environmental awareness and climate change policy. *Energy Policy*, v. 180, p. 113687, 2023.

KABIR, Md Ahsan et al. Sustainable energy transition in Bangladeshi academic buildings: A techno-economic analysis of photovoltaic-based net zero energy systems. *Energy and Buildings*, p. 114205, 2024.

KHAN, Abeer Ali et al. Global warming potential of photovoltaics with state-of-the art silicon solar cells: Influence of electricity mix, installation location and lifetime. ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, v. 269, p. 112724, 2024.

KHEZRI, Mohsen; HESHMATI, Almas; KHODAEI, Mehdi. Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO2 emissions. *Applied Energy*, v. 306, p. 117948, 2022.

LIMA, M. A. et al. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. *Environmental Development*, v. 33, p. 100504, 2020.

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

PCR EPDItaly014 – Photovoltaic modules. *Electricity Produced By Photovoltaic Modules*, 2022.

PHOTOVOLTAICS REPORT. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. Freiburg, 2023.

ROY, Riya; PEARCE, Joshua M. Is small or big solar better for the environment? Comparative life cycle assessment of solar photovoltaic rooftop vs. ground-mounted systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 29, n. 3, p. 516-536, 2024.

SACCARDO, Ronaldo Ricardo et al. INVESTMENT IN PHOTOVOLTAIC ENERGY: AN ATTEMPT TO FRAME BRAZIL WITHIN THE 2030 PASSAGE TARGET OF THE PARIS AGREEMENT. *Cleaner Energy Systems*, p. 100070, 2023.

SHERWANI, A. F. et al. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 1, p. 540-544, 2010.

SUMPER, Andreas et al. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 8, p. 3888-3896, 2011.

UNFCCC . The Paris Agreement. 2023. Disponível em:
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> . Acesso em: 16 out. 2023.

THOMAS E.. GRAEDEL; ALLENBY, Braden R.; AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY. **Industrial ecology**. New York: Prentice Hall., 1995.