

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Análise do ciclo de vida de componentes de painel
fotovoltaico: estudo do berço-ao-portão**

Wilson De Paula Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez

Santa Bárbara d'Oeste,

2021

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Análise do ciclo de vida de componentes de painel
fotovoltaico: estudo do berço-ao-portão**

Wilson De Paula Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP.

Santa Bárbara d'Oeste,

2021

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecário: Fábio Henrique dos Santos Corrêa – CRB: 8/10150

T266a Teixeira, Wilson de Paula
Análise do ciclo de vida de componentes de painel fotovoltaico:
estudo do berço-ao-portão / Wilson de Paula Teixeira. – 2021.
87 fls.; il.; 30 cm.

Orientador (a): Prof. Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Santa
Bárbara D'Oeste, 2021.

1. Energia fotovoltaica. 2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).
3. Energia renovável. I. Méndez, Manoel Orlando Alvarez. II. Título.

CDD – 621.47



ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE COMPONENTES DE PAINEL FOTOVOLTAICO: ESTUDO DO BERÇO-AO-PORTÃO

WILSON DE PAULA TEIXEIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 30 de abril de 2021, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:


Prof. Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez
Orientador


Prof. Dr. Remo Augusto Padovezi Filleti - PPGEP/UNIMEP
Presidente e Membro Titular


Prof. Dr. Fábio Neves Puglieri – PPGEP/UTFPR

A minha família, com extrema gratidão pela dedicação, apoio e compreensão em todos os momentos da vida.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar saúde e força de vontade para conseguir alcançar este objetivo.

Ao professor da UNIMEP e coordenador do Laboratório de Materiais Carbonosos, Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez, pela orientação, amizade e incentivo.

Aos professores, colaboradores e colegas de pós-graduação que fizeram parte deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha namorada Alexandra Providello, à minha mãe Ana M. Simioni e ao meu irmão Willian de P. Teixeira, por toda compreensão e dedicação constante, meus sinceros agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Brasil.

“A maior recompensa do trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso”.

John Ruskin

TEIXEIRA, W. P. Análise do ciclo de vida de componentes de painel fotovoltaico: estudo do berço-ao-portão. 2021. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2021.

RESUMO

A população mundial vem aumentando continuamente desde a primeira revolução industrial, chegando a, aproximadamente, 7,3 bilhões de seres humanos em 2015 e com previsão de chegar a 10 bilhões em 2050. Para atender às demandas dessa crescente população mundial, é fundamental a ampliação da capacidade de geração de energia elétrica, especialmente a partir de fontes renováveis de energia. Dentre as diferentes fontes de energias renováveis existentes, a energia fotovoltaica se apresenta como uma solução viável e limpa, especialmente em países com elevadas taxas de irradiações, como o Brasil. Apesar disso, a produção dos painéis solares fotovoltaicos (equipamentos responsáveis pela geração de eletricidade a partir da energia solar) demanda materiais como alumínio e o silício, os quais necessitam de grandes quantidades de energia para serem produzidos, e, por esse motivo, representam um elevado potencial de impacto ambiental. A partir desse contexto, o presente trabalho buscou investigar os impactos ambientais potenciais, do berço-ao-portão (“*cradle-to-gate*”, em inglês), para os componentes utilizados na produção de três módulos solares fotovoltaicos, por meio da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Os componentes presentes no módulo solar foram identificados e quantificados, no sentido de mensurar as massas de cada um para quantificar os impactos ambientais inerentes aos seus processos de fabricação, bem como de seus materiais, em especial o silício, o vidro e o alumínio. Dentre esses materiais, o silício teve o maior impacto ambiental em 15 das 18 categorias de impactos analisadas, representando, por exemplo, entre 74% e 79% dos resultados de mudanças climáticas, e entre 95% e 97% dos resultados de consumo de água dos módulos avaliados. Tais resultados são relevantes, pois auxiliam na identificação dos componentes que mais causam impactos ambientais e que, por esse motivo, devem ter uma atenção especial em estratégias/ações de reutilização, remanufatura e/ou reciclagem de painéis solares fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Energia Renovável.

TEIXEIRA, W. P. Analysis of the life cycle of photovoltaic panel components: study of the cradle-to-gate. 2021. 87f. Thesis (Master Science in Production Engineering) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2021.

ABSTRACT

World population has been increasing continuously since the first industrial revolution, reaching approximately 7.3 billion human beings in 2015, and expected to reach about 10 billion in 2050. To meet the demands of this global growing population, it is essential to expand the electricity capacity generation, especially from renewable energy sources. Among the different available sources for renewable energy, photovoltaic energy presents itself as a viable and clean solution, especially in countries with high irradiation rates, such as Brazil. Despite this, the production of photovoltaic solar panels (equipment responsible for generating electricity from solar energy) requires high energy intensive materials such as aluminum and silicon, representing a high potential for environmental impact. In this context, the present work sought to investigate the potential environmental impacts of the components used in the production of three photovoltaic solar modules, using the tool Life Cycle Assessment (LCA) from a cradle-to-gate perspective. The components present in the solar module were identified and quantified, in order to measure their masses and to compute the environmental impacts inherent to their manufacturing processes and materials, especially silicon, glass and aluminum. Among these materials, silicon had the greatest environmental impact for 15 of the 18 impact categories analyzed, representing, for example, between 74% and 79% of climate change impact, and between 95% and 97% of the water consumption impact results from the evaluated photovoltaic modules. These results are important because they support the identification of the most environmental impactful components/materials, which may be addressed as environmental hotspots for extended lifecycle strategies/actions, such as reusing, remanufacturing and/or recycling of photovoltaic solar panels.

Keywords: Photovoltaic Energy; Life Cycle Assessment (LCA); Renewable Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação de energia renovável na matriz energética brasileira (2017 e 2018) e na mundial. Adaptado de: EPE (2019) e IEA (2020b).	2
Figura 2: Oferta de energia elétrica por fonte no ano de 2017 (EPE, 2018a).....	3
Figura 3: Consumo energia elétrica na matriz brasileira 2013-2017 (Adaptado de EPE, 2018a).	3
Figura 4: Estrutura do trabalho.....	9
Figura 5: Evolução do preço da placa solar fotovoltaica por Watt (BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE, 2015).	12
Figura 6: Potência instalada (MW) de energia solar fotovoltaica por Estado, e respectiva porcentagem (%) (ABSOLAR, 2019).....	13
Figura 7: Custo de instalação de energia solar FV (R\$/Wp) para as potências de 5KWp; 6-30 KWp; 31-100 KWp e acima de 100 KWp. (IDEAL, 2018).....	13
Figura 8: Painel solar fotovoltaico de silício monocristalino (PORTAL SOLAR, 2020)...	17
Figura 9: Painel solar fotovoltaico de silício policristalino (PORTAL SOLAR, 2020).	18
Figura 10: Filme fino (SILVEIRA, 2016).	18
Figura 11: Célula de multi-junção (NAVAL RESEARCH LABORATORY, 2013).....	20
Figura 12: Classes de tecnologia FV (IFC, 2015).....	20
Figura 13: Ligação em serie de 36 células voltaicas em um módulo (CARNEIRO, 2010).	21
Figura 14: Contato frontal da célula soldada. (CARNEIRO, 2010).....	21
Figura 15: Componentes utilizados na construção de módulos fotovoltaicos (Adaptado de CLEAN ENERGY REVIEWS, 2018).....	22
Figura 16: Estrutura básica de uma célula FV de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p; (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos (CRESESB, 2014).....	23
Figura 17: Cadeia simplificada da indústria fotovoltaica (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).	26

Figura 18: Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado em um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul (CRESESB, 2014).	27
Figura 19: Mapa de radiação horizontal diária média anual do Brasil ($Wh/m^2\cdot dia$) (INPE, 2017).....	28
Figura 20: Mapa de insolação diária média anual (horas) (THE WORLD BANK, 2019).29	
Figura 21: Etapas da ACV (ABNT, 2009a).	33
Figura 22: Fluxograma simplificado da revisão sistemática.....	38
Figura 23: Interface do software SimaPro e inserção de dados.	40
Figura 24: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 1.	49
Figura 25: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 2.	50
Figura 26: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 3.	51
Figura 27: Impactos ambientais relativos avaliados no Módulo 1.....	61
Figura 28: Impactos ambientais relativos avaliados no Módulo 2.....	61
Figura 29: Impactos ambientais relativos avaliados no módulo 3.....	62
Figura 30: Preposição de um framework para a aplicação da ACV em módulo FV.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ranking dos 10 países com maior capacidade instalada até 2017 (IEA, 2018).	11
Tabela 2: Descrição das diferentes funções que compõem um módulo solar (CARNEIRO, 2010).	22
Tabela 3: Avaliação de ciclo de vida de diversos sistemas fotovoltaicos (FENG et al., 2014).	31
Tabela 4: Especificações técnicas dos módulos 1, 2 e 3 utilizados no estudo.	39
Tabela 5: Especificações dos fluxos de materiais e processos inseridos no SimaPro. ...	40
Tabela 6: Identificação e endereços dos fornecedores de vidro, alumínio e silício grau solar, dos produtores de módulos solares FV e dos portos utilizados para a simulação dos fretes.	43
Tabela 7: Distância do frete das indústrias produtoras de vidro, alumínio e silício grau solar até o site de produção do módulo solar FV e distância do frete da fábrica até um vendedor de módulos solares em Piracicaba/SP.	44
Tabela 8: Relação de itens que constituem o módulo FV 1.	50
Tabela 9: Relação de itens que constituem o módulo FV 2.	51
Tabela 10: Relação de itens que constituem o módulo FV 3.	52
Tabela 11: Componentes dos módulos solares FV, em grama (g) e porcentagem (%).	52
Tabela 12: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 1.	57
Tabela 13: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 2.	58
Tabela 14: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 3.	59
Tabela 15: Emissões de CO ₂ -eq para produção unitária e produção anual, e precificação de créditos de carbono em reais (R\$), para os módulos 1, 2 e 3.	67

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ -eq	Dióxido de Carbono Equivalente
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
EVA	Etileno Acetato de Vinilo
IEA	<i>International Energy Agency</i> (em português: Agência Internacional de Energia)
IEEFA	<i>Institute for Energy Economics and Financial Analysis</i> (em português: Instituto de Economia Análise Financeira para Energia)
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (em português: Agência Internacional de Energia Renovável)

ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (em português: Organização Internacional para Padronização)
FV	Fotovoltaico
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
Mtep	Milhões de Tonelada Equivalente de Petróleo.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (em português: Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
SiGE	Silício grau eletrônico
SiGM	Silício grau metalúrgico
SiGS	Silício grau solar

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1	Objetivos	5
1.1.1	Objetivo Geral	5
1.1.2	Objetivos Específicos	5
1.2	Justificativa	6
1.3	Estrutura do Trabalho	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Energia Fotovoltaica	10
2.2	Histórico evolutivo do painel solar	14
2.3	Tipos de células solares	17
2.4	Materiais e componentes dos módulos FV de 1ª Geração	21
2.5	Métodos de produção do silício	24
2.6	Índice Solarimétrico	26
2.7	Emissões de GEE na Indústria Fotovoltaica	29
2.8	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	32
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	36
3.1	Pesquisa Bibliográfica	37
3.2	Definição do escopo	38
3.3	Estudo de Inventário de Ciclo de Vida	41
3.4	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Resultados de ICV da desmontagem dos módulos FV	49
4.2	Resultados de AICV dos módulos FV	56
4.3	Compensação de Carbono	66
4.4	Proposição de um <i>framework</i> para aplicação da ACV em módulos solares FV	67
5	CONCLUSÕES	70
5.1	Propostas para Pesquisas Futuras	71
	REFERÊNCIAS	72

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), a população mundial atingiu cerca de 7,3 bilhões de habitantes em 2015. Em 2005, a população mundial crescia 1,24% por ano, já em 2015 o crescimento foi de 1,18% por ano, ou seja, cerca de 83 milhões de pessoas por ano. A população mundial deverá aumentar em 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, passando de 7,7 bilhões atualmente para 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2019).

Como consequência do aumento populacional, é previsto crescimento no consumo de energia que já vem ocorrendo desde 1990 (117,37%) (IEA, 2020a). A produção mundial de energia foi de 14.421 Mtep¹ em 2018, representando um aumento de 3,2% em relação a 2017. Foi principalmente impulsionada por combustíveis fósseis, tais como o gás natural, carvão e petróleo. Todas as energias renováveis e nucleares também aumentaram, em 60 Mtep e 19 Mtep, respectivamente, contudo os combustíveis fósseis ainda representam a maior parcela das fontes de produção, representando mais de 81% do total em 2017 e 2018 (IEA, 2020b).

No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (EPE, 2018a), o maior consumo de energia vem dos setores industriais (32,9%), seguido pelo transporte (32,7%), eletricidade (10,1%) e residências (9,7%), sendo que o industrial e o de transporte correspondem a aproximadamente 66% do total de consumo de energia no País.

O setor industrial, responsável pelo maior consumo de energia, usou 57% de fontes renováveis, enquanto para o transporte, 64% do consumo foi proveniente de fontes não renováveis, na sua maioria por combustíveis provenientes do petróleo (EPE, 2018a).

Em comparação com a matriz energética mundial, o Brasil se encontra em uma posição de destaque com relação ao uso de energias renováveis. Enquanto a média mundial foi de 13,9%, em 2018, o Brasil atingiu de 45,3% de fontes renováveis em sua

¹ Mtep – Milhões de tonelada equivalente de petróleo.

matriz energética no mesmo ano (Figura 1). Apesar de possuir uma matriz energética mais renovável, quando comparado à média mundial, o Brasil ainda é muito dependente do uso do petróleo e seus derivados, especialmente no setor de transporte (EPE, 2018a).

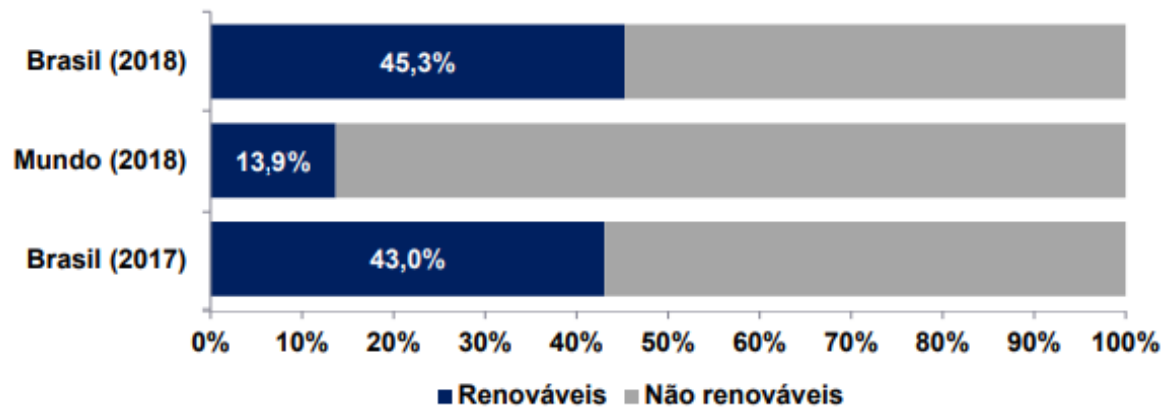


Figura 1: Participação de energia renovável na matriz energética brasileira (2017 e 2018) e na mundial. Adaptado de: EPE (2019) e IEA (2020b).

Quando se observa apenas a produção de energia elétrica, a participação de fontes renováveis no Brasil quase dobra: chegando a 80% da produção, com 65,2% sendo gerada por hidroelétricas, como mostra a Figura 2 (EPE, 2018b):

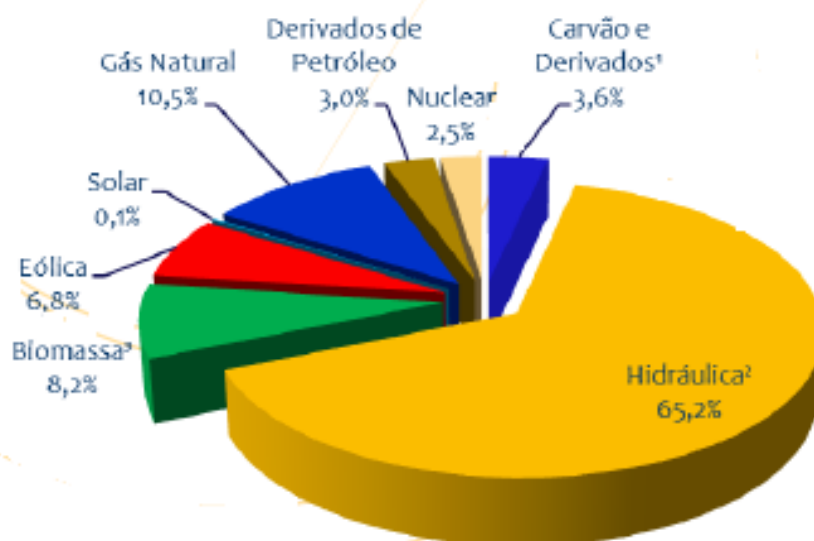


Figura 2: Oferta de energia elétrica por fonte no ano de 2017 (EPE, 2018a).

No país, o uso da energia gerada por hidroelétrica é prevacente (EPE, 2018b; MELO et al., 2019), entretanto, devido à escassez hídrica ocorrida nos últimos anos (ANA, 2019), há necessidade de se buscar outras fontes de energias renováveis (e.g., energia eólica, energia fotovoltaica) para suprir a crescente demanda por eletricidade, que, em 2017, chegou a 150 mil MW de consumo de energia elétrica, conforme mostra a Figura 3 (EPE, 2018a).

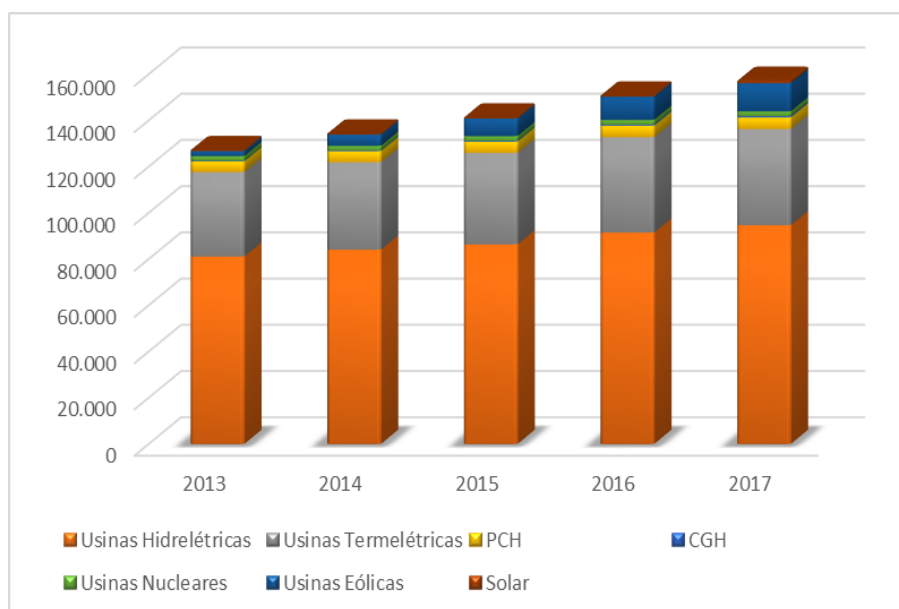


Figura 3: Consumo energia elétrica na matriz brasileira 2013-2017 (Adaptado de EPE, 2018a).

O conceito de energia renovável está ligado às fontes que são naturalmente reabastecidas, tais como o sol, os rios, a chuva, o vento e as marés. Nesse sentido, a energia solar fotovoltaica é aceita como fonte de energia renovável (DJØRUP, THELLUFSEN, SORKNÆS, 2018).

Atualmente, com as aplicações tecnológicas disponíveis, a geração de energia elétrica a partir da radiação solar pode ser obtida pelo efeito fotovoltaico (FV) (ESPOSITO, FUCHS, 2013). Em 2017, a capacidade instalada desse tipo de tecnologia atingiu quase 398 GW e gerou mais de 460 TWh de energia, representando cerca de 2% da produção mundial de energia. Dessa capacidade instalada, 60% são provenientes de iniciativas públicas/governamentais, enquanto o restante é de aplicações distribuídas (residencial, comercial e *off-grid*). Nos próximos cinco anos, a energia solar fotovoltaica deverá liderar o crescimento da capacidade de eletricidade renovável, expandindo em quase 580 GW (IEA, 2019a).

Os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica possuem a vantagem de não emitir Gases do Efeito Estufa (GEE) durante sua operação (PENG, LU, YANG, 2013; GONG, DARLING, YOU, 2015; LIRA et al., 2019). No entanto, durante a produção e instalação desses sistemas, há consumo relevante de materiais e de energia, ocasionando impactos ambientais durante os processos de extração, fabricação e montagem dos módulos FV (PENG, LU, YANG, 2013).

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar os impactos ambientais potenciais de produtos, como os módulos FV, é por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (DESIDERI et al., 2013; YUE, YOU, DARLING, 2014; BHANDARI et al., 2015; LATUNUSSA et al., 2016; ABDOLI, PAMULAPATI, KARA, 2020; LAUSSELET et al., 2020; PINTO et al., 2020). Essa ferramenta é definida como uma ferramenta analítica para avaliação dos impactos ambientais associados a um produto durante seu ciclo de vida (MENDES, 2013; MONARO, 2014).

Assim, considerando o potencial de crescimento na implantação de sistemas fotovoltaicos e os possíveis impactos ambientais que poderão ser gerados, formula-se a seguinte pergunta-pesquisa:

Quais são os componentes dos módulos solares fotovoltaicos que mais causam impactos ambientais potenciais, considerando as diferentes fases do seu ciclo de vida até a finalização do produto?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar os impactos ambientais potenciais associados aos componentes usados para a produção de módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino de 1ª geração, com o intuito de identificar aqueles com maior carga ambiental.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar este objetivo, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica sobre painéis solares FV e ACV para servir como fundamentação teórica do estudo.
- Identificar e quantificar os componentes eletrônicos e demais componentes existentes em um módulo solar fotovoltaico de silício de 1ª geração, visando estimar a fração de massas dos materiais, para fornecer suporte ao estudo de ACV;
- Identificar os impactos ambientais potenciais dos componentes dos painéis solares estudados, utilizando a abordagem do berço-ao-portão (“*cradle-to-gate*”, em inglês), na qual avalia-se os impactos do ciclo de vida do produto, desde a extração de matérias-primas, transporte, produção e montagem do produto, e entrega até um centro de vendas, não sendo considerados a fase de utilização e seu descarte final;

- Proposição um *framework* para a aplicação da avaliação do ciclo de vida em módulos solares fotovoltaico de silício cristalino de 1ª geração.

1.2 Justificativa

A principal contribuição desta pesquisa consiste em conciliar 2 assuntos de relativa relevância para o momento atual: Módulo solar fotovoltaico e ACV.

Nos últimos anos, a ACV em módulos solares FV tem sido largamente estudada em função de seu potencial em propor uma alternativa à problemática ambiental de geração de energia elétrica (PAVLOVIC et al., 2013; CHOU et al., 2015; CHEN et al., 2016; SOUZA et al., 2017).

O Brasil possui grande potencial de geração para esse tipo de energia, pois possui uma extensa área geográfica com condições favoráveis, em especial taxas altas e constantes de irradiação durante o ano todo (DIAS et al., 2017). De acordo com Santos et al. (2020), o país possui um potencial de geração fotovoltaico superior a 28.500 GW, considerando apenas grandes usinas de energia solar.

Além disso, outro fator importante para o país é a existência de grandes reservas de quartzo, as quais podem gerar vantagens competitivas para produção de silício, sendo este um dos principais componentes das células fotovoltaicas (ECHEGARAY, 2014).

A geração de energia solar se destaca também por ser um importante elemento de diversificação da matriz energética brasileira (PAIM et al., 2019). Desde 2012, o Brasil vive um período de seca severa (ANA, 2019), principalmente na região Nordeste. Tal evento foi relevante na redução da participação da energia hidrelétrica na matriz elétrica brasileira, passando de 81,8%, em 2011, para 65,2%, em 2018 (EPE, 2018b; MELO et al., 2019). Esse vácuo energético foi preenchido por termoelétricas alimentadas principalmente por combustíveis fósseis, ocasionando, entre outras coisas, na elevação dos preços gerais da eletricidade (SANTOS et al., 2020).

No entanto, mesmo as energias renováveis podem ter algumas repercussões ambientais adversas. Uma vez fora da fase de fabricação e totalmente instalados, os sistemas fotovoltaicos estão completamente seguros para o meio ambiente; eles não produzem nenhum ruído, nem emitem nenhum gás tóxico ou de efeito estufa. Mas, assim como qualquer produto industrial, a fabricação de células e painéis solares tem alguns impactos na saúde humana e ao meio ambiente (RABAIA et al., 2021).

Para conhecer esses impactos, lançou-se mão da ACV. A ACV é um método consolidado para avaliação de impactos ambientais oriundos do processo produtivo. É também uma importante ferramenta para tomada de decisões e definição de prioridade na etapa produtiva. Os indicadores gerados pela ACV são importantes para uma possível mudança de tecnologia no processo de produção ou do produto, otimizando o uso de energia e materiais utilizados (BLANCO et al., 2020). Sendo assim, a ACV será uma ferramenta muito importante para estudar e mensurar os impactos ambientais gerados pelos componentes usados na produção do módulo fotovoltaico.

Ressalta-se, também, a contribuição desta pesquisa em propor um *framework* para a aplicação para avaliação do ciclo de vida em módulos solares fotovoltaico de silício cristalino de 1ª geração, visando servir de base para novos estudos de ACV em módulos FV similares.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, detalhados a seguir (Figura 4):

- **1. Introdução** – Neste capítulo é apresentado a importância do trabalho, a justificativa, o problema a ser estudado, os objetivos e a estrutura do trabalho.
- **2. Desenvolvimento Teórico** – Este capítulo está dividido em subcapítulos que abordam temas que venham a dar suporte para a interpretação e análise dos resultados, assim como para as conclusões finais, como: as pesquisas referentes ao módulo solar FV, avaliação do ciclo de vida (ACV), emissões de GEE na indústria fotovoltaica, matérias e componentes dos módulos fotovoltaicos,

produção do módulo, histórico da energia fotovoltaica, tipos de módulos solares, as etapas do processo produtivo e as considerações finais do capítulo.

- **3 Abordagem Metodológica** – É apresentado neste capítulo a estrutura metodológica, sintetizada a respeito das etapas do trabalho, são descritas também as metodologias utilizadas para a análise dos dados coletados e a técnica para a coleta dos dados.
- **4 Resultados** – Este capítulo apresenta os resultados coletados, assim como discussões a respeito dos impactos ambientais potenciais em relação ao sistema de produção do cenário modelado.
- **5 Conclusões** – São apresentadas as conclusões finais após a discussão a respeito dos resultados obtidos em relação à problemática e os objetivos propostos, a partir da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

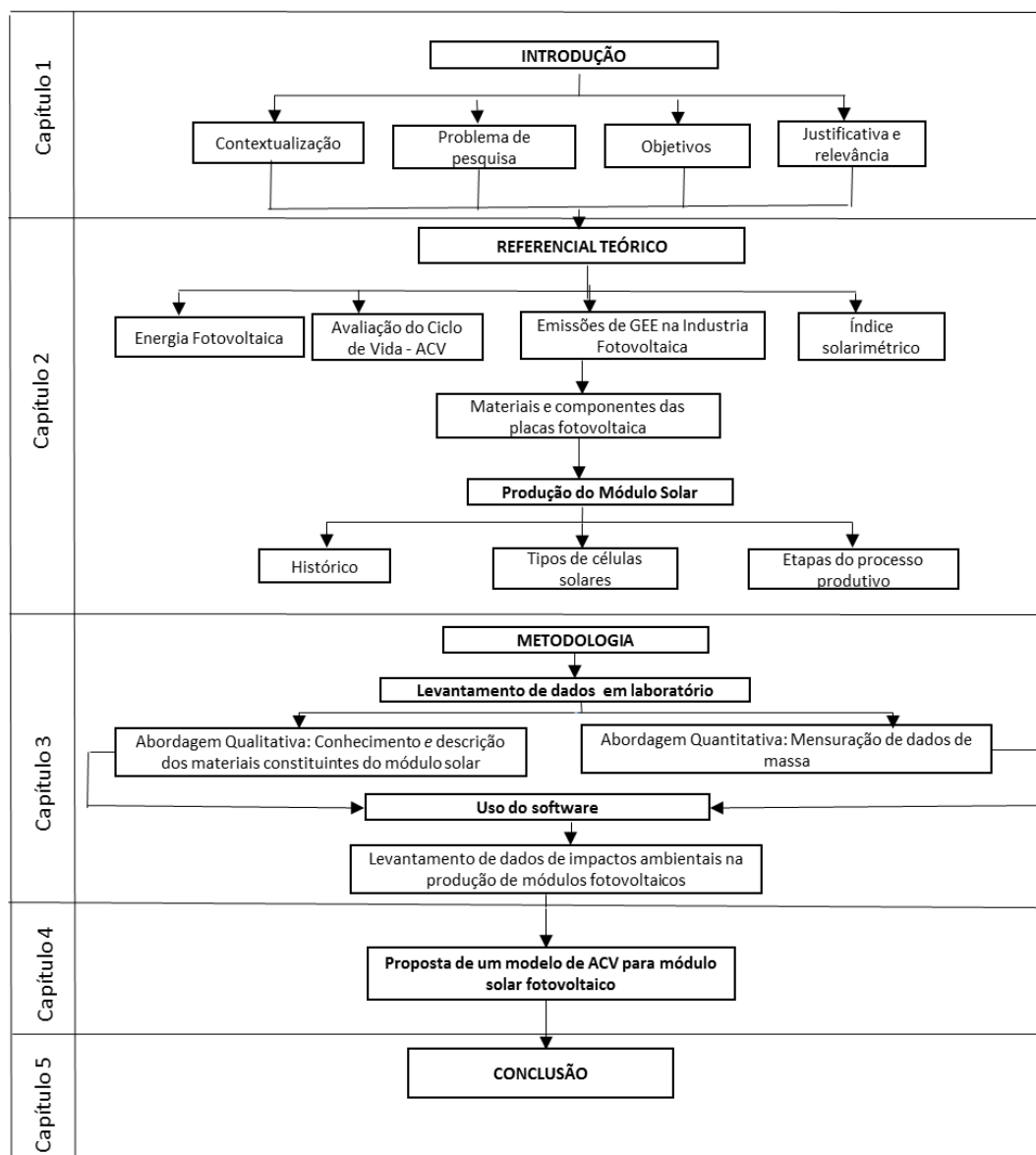


Figura 4: Estrutura do trabalho

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são abordados os conceitos que fundamentam o presente trabalho, tais como: Energia fotovoltaica, Índice Solarimétrico no Brasil, Processos produtivos dos módulos solares FV, emissões de carbono nesta indústria.

2.1 Energia Fotovoltaica

A energia solar é uma importante fonte alternativa de energia aos combustíveis fósseis e, teoricamente, a fonte mais disponível de energia no planeta (DESIDERI et al., 2013). Por meio do efeito fotovoltaico, células solares convertem diretamente a energia provinda do sol em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não poluente e renovável (RÜTHER, 2004).

A conversão fotovoltaica é a transformação direta da luz solar na eletricidade a partir de dispositivos fotovoltaicos, sendo eles robustos e de design simples, exigindo pouca manutenção. Sua maior vantagem é a construção como sistemas independentes para fornecer saídas que podem variar de microwatts para megawatts (GOETZBERGER, HOFFMANN, 2005; PARIDA et al., 2011).

O bloco básico de construção dos dispositivos FV é um elemento semicondutor conhecido como célula fotovoltaica. As células fotovoltaicas podem ser feitas de diferentes tipos de materiais semicondutores, especialmente o silício monocristalino ou policristalino (DESIDERI et al., 2013). Quando as células estão interconectadas, o módulo FV é integrado com um número de componentes adicionais, por exemplo, inversores, baterias, componentes básicos e sistemas de montagem (AMAN et al., 2015).

Os sistemas fotovoltaicos produzem eletricidade sem emissão de poluentes no ar durante sua operação e tem uma “pegada de carbono” muito baixo ao longo da vida útil, proporcionando desempenho ambiental superior em comparação com a geração

tradicional de eletricidade baseada em tecnologias de combustíveis fósseis (YUE, YOU, DARLING, 2014).

O mercado internacional de painéis solares fotovoltaicos de silício vem crescendo em ritmo acelerado, e a previsão é que continue com aumentos anuais na ordem de 40%. Aproximadamente 90% dos painéis fotovoltaicos produzidos utilizam silício, e a previsão de intensificação do uso desses sistemas solares no planeta demandará uma quantidade de silício diversas vezes superior à produção atual (CGEE, 2009; ABSOLAR, 2019).

A Tabela 1 apresenta ranking dos países com maior capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica até 2017. A partir dela, é possível verificar que a China lidera a posição com 131 GW de capacidade instalada, seguido pelo EUA com 51 GW.

Tabela 1: Ranking dos 10 países com maior capacidade instalada até 2017 (IEA, 2018).

	Países	Capacidade Instalada em GW
1	China	131
2	EUA	51
3	Japão	49
4	Alemanha	42
5	Itália	19,7
6	Índia	18,3
7	Reino Unido	12,7
8	França	8
9	Austrália	7,2
10	Espanha	5,5

A China, país que atualmente lidera os investimentos em energias renováveis, investiu mais de 7,1 trilhões de dólares no setor fotovoltaico de 2005 a 2015 (IEEFA, 2017; SPE, 2020). Tal volume de investimentos, além de garantir uma capacidade instalada muito superior às dos demais países também, promoveu a queda do custo da geração na última década. Tal fato foi um dos fatores que possibilitou a energia solar tornar-se cada vez mais atraente. Um estudo realizado pela Bloomberg New Energy Finance (2017) mostra o preço do painel solar caiu 99,6% entre 1977 e 2015 (Figura 5).

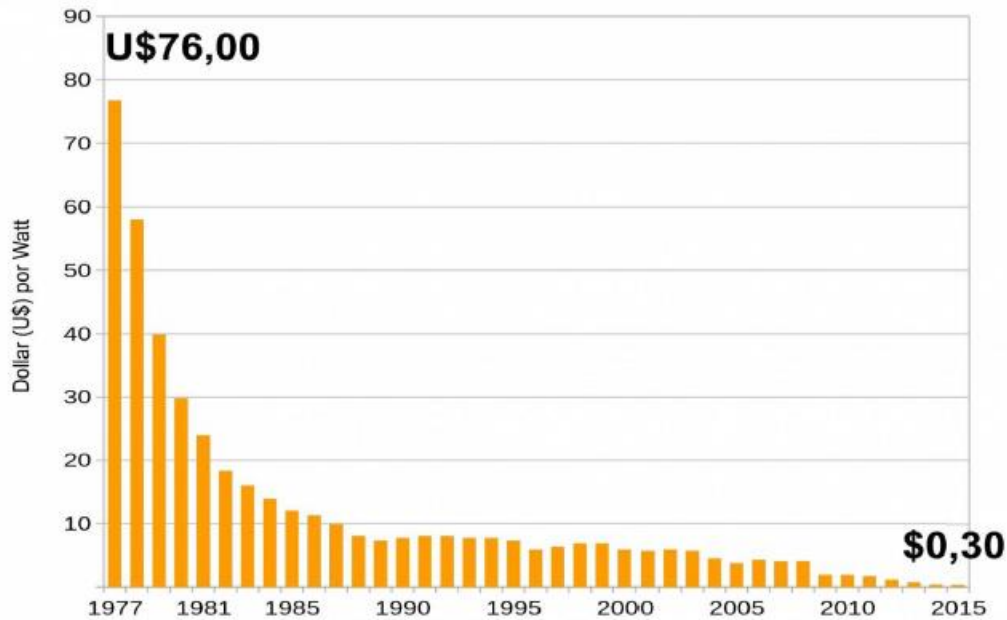


Figura 5: Evolução do preço da placa solar fotovoltaica por Watt (BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE, 2015).

O Brasil instalou 1,2 GW em 2018, totalizando 2,4 GW de capacidade instalada acumulada. Ainda é previsto investimento de R\$ 25,4 bilhões em projetos de instalação de energia solar fotovoltaica até o ano de 2025 (ABSOLAR, 2019). A Figura 6 apresenta a potência de energia solar fotovoltaica instalada em cada estado do país, em números absolutos (MW) e relativos em porcentagem (%).

Seguindo a tendência mundial, no Brasil também vem ocorrendo a redução dos custos de implantação de energia solar FV (IDEAL, 2018). Para uma potência de até 5 KWp custava em 2013 R\$ 8,63/Wp passando a custar em 2017 R\$ 6,29/Wp. A Figura 7 apresenta o preço de instalação de energia solar FV (R\$/Wp) para as potências de 5KWp; 6-30 KWp; 31-100 KWp e acima de 100 KWp.

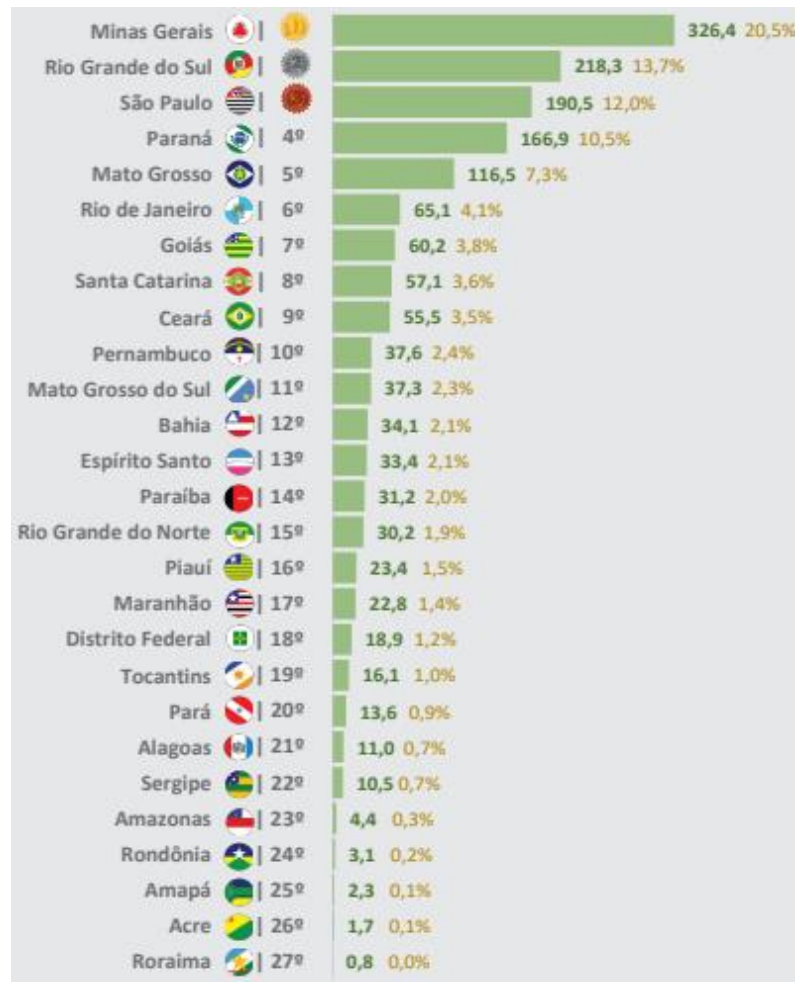


Figura 6: Potência instalada (MW) de energia solar fotovoltaica por Estado, e respectiva porcentagem (%) (ABSOLAR, 2019).

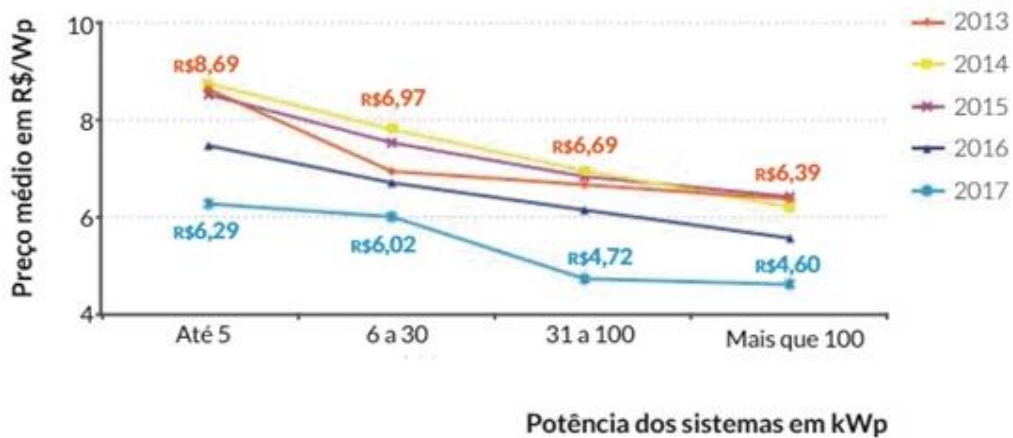


Figura 7: Custo de instalação de energia solar FV (R\$/Wp) para as potências de 5KWp; 6-30 KWp; 31-100 KWp e acima de 100 KWp. (IDEAL, 2018).

2.2 Histórico evolutivo do painel solar

Em 1839, o físico francês Alexandre-Edmond Becquerel verificou pela primeira vez o efeito fotovoltaico nos laboratórios da Bell. Ele observou esse efeito em uma célula eletrolítica, que foi feita de dois eletrodos de platina, colocados em uma solução eletricamente condutora (eletrólito). Becquerel usou cloreto de prata dissolvido em uma solução ácida e observou que a corrente elétrica da célula foi aumentada quando sua instalação foi irradiada com luz solar (FRAAS, 2014; JÄGER et al., 2014; HOANG, 2017; MA, LI, ZHAO, 2019).

Em 1876, o físico e filósofo britânico William Grylls Adams, junto com seu aluno Richard Evans Day, demonstrou o efeito fotovoltaico em uma junção na platina e no selênio semicondutor, no entanto com um desempenho muito ruim. Sete anos depois, o inventor americano Charles Fritts conseguiu fazer um dispositivo fotovoltaico, baseado em uma junção de ouro e selênio, com uma eficiência de conversão de 1% (SMITH, 1873; SPANGGAARD, KREBS, 2004; JÄGER et al., 2014).

Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz descobriu o efeito fotoelétrico, no qual, os elétrons são emitidos de um material que absorveu luz com um comprimento de onda menor que a frequência limite dependente do material. Em 1905, Albert Einstein publicou um artigo em que ele explicou o efeito fotoelétrico ao assumir que a energia luminosa era transportada com pacotes de energia, que hoje chamamos de fótons (JÄGER et al., 2014).

O antraceno foi o primeiro composto orgânico cuja fotocondutividade foi observada, tanto por Pochettino, em 1906, quanto por Volmer, em 1913 (FRAAS, 2014).

Em 1918, o químico polonês Jan Czochralski inventou um método para produzir materiais cristalinos de alta qualidade. Atualmente, essa técnica é muito importante para a produção de silício monocristalino usado em células solares de silício de alta qualidade (JÄGER et al., 2014; VILLALVA, 2015).

Em 1953, o químico americano Dan Trivich foi o primeiro a realizar cálculos teóricos referentes ao desempenho de célula solar para materiais com intervalos

diferentes de bandas de absorção de radiação solar. O verdadeiro desenvolvimento das células solares, como as conhecemos hoje, começou nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos. Em 1954, Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller e Gerald L. Pearson, fizeram um teste baseado em célula solar de silício com uma eficiência de cerca de 6% (JÄGER et al., 2014). No mesmo ano, Reynolds e sua equipe relataram o efeito fotovoltaico para outro semiconductor, o sulfeto de cádmio (CdS) (FRAAS, 2014; JÄGER et al., 2014; HOANG, 2017).

Em meados e final da década de 1950, diversas empresas e laboratórios começaram a desenvolver células solares à base de silício para alimentar satélites que orbitam a Terra, e.g., RCA Corporation, a Hoffman Electronics Corporation, e o Corpo de Sinais do Exército dos Estados Unidos (CRESESB, 2004). A pesquisa sobre tecnologia fotovoltaica era principalmente impulsionada pelo fornecimento de energia às aplicações espaciais. Por exemplo, o satélite americano Vanguard 1, que foi lançado pela Marinha dos EUA em 1958, foi alimentado por células solares da Hoffman Electronics. Foi o quarto satélite artificial da Terra e o primeiro a ser alimentado por células solares. Estava em operação até 1964 e ainda está orbitando a Terra. Em 1962, os Laboratórios Bell Telephone lançaram os primeiros satélites de telecomunicações movidas a energia solar e, em 1966, a NASA lançou o primeiro Observatório Astronômico em órbita, com um painel solar fotovoltaico de 1 kW (KALOGIROU, 2009; JÄGER et al., 2014).

Em 1970, o físico soviético Zhores Alferov desenvolveu células solares baseadas em uma heterojunção de arseneto de gálio. Em 1976, Dave E. Carlson e Chris R. Wronski desenvolveram o primeiro filme fotovoltaico de película fina, baseado em silício amorfo nos laboratórios da RCA. Em 1978, as empresas japonesas SHARP e Tóquio Laboratório de Aplicação Eletrônica desenvolveram a primeira calculadora solar (FRAAS, 2014; JÄGER et al., 2014).

Por causa da crise do petróleo, induzida pelo embargo da Opep em 1973, houve um aumento acentuado do preço do petróleo. Tal aumento resultou na ampliação do interesse público em tecnologia fotovoltaica para aplicação terrestre. Naquela época, a tecnologia fotovoltaica passou de uma tecnologia de nicho em aplicações espaciais

para uma tecnologia de aplicações terrestres. No final dos anos 1970 e durante a década de 1980, muitas empresas começaram a desenvolver módulos e sistemas fotovoltaicos para aplicações terrestres (CRESESB, 2004).

Em 1980, as primeiras células solares de película fina baseadas em uma junção cádmio-sulfeto foram demonstradas com uma eficiência de conversão acima de 10% na Universidade de Delaware. Em 1985, células solares de silício cristalino com eficiência acima de 20% foram demonstradas no Universidade de New South Wales, na Austrália (JÄGER et al., 2014).

Em 1991, a primeira célula solar sensibilizada por corante de alta eficiência foi revelada por Michael Grätzel e seu grupo de trabalho na École Polytechnique Fédérale de Lausanne, na Suíça, sendo esta célula uma espécie de sistema fotoeletroquímico, no qual um material semiconductor a base de sensibilizadores moleculares é colocado entre um fotoânodo e um eletrólito (JÄGER et al., 2014).

De acordo com a CRESESB (2019), no ano de 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu um recorde de 60 MWp², sendo o silício o material mais utilizado, devido suas excelentes propriedades semicondutoras, estabilidade térmica, baixo custo de produção, resistência ao desgaste e elevada vida útil. Para fins de produção fotovoltaica, o silício pode ser explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo (SÁNCHEZ et al., 2011).

Em 1999, o total da energia fotovoltaica instalada global passou de 1 GWp. A partir de 2000, as questões ambientais se tornaram cada vez mais importantes na discussão pública, que renovou o interesse público na energia solar. Desde então, o mercado fotovoltaico tem se transformado de um mercado local para um mercado global (CRESESB, 2019).

Desde 2008, o governo chinês tem investido pesadamente em sua indústria fotovoltaica. Como um resultado, a China se tornou o maior fabricante de módulos fotovoltaicos (FRAAS, 2014). Em 2019, a energia solar mundial superou a capacidade de 627 GW (REPN, 2020).

² MWp (megawatt-pico) é uma potência de aproximadamente 15-20% menor que a potência nominal, devido ao aquecimento considerável das células solares.

2.3 Tipos de células solares

As células fotovoltaicas são classificadas em gerações, segundo o tipo de tecnologia que emprega para sua produção (CARVALHO, 2014):

- Células de primeira geração ou cristalinas

São células fabricadas a partir de *wafers* de um semicondutor, tais como o silício (Si) e o Arseneto de gálio (GaAs), podendo ser monocristalinos ou policristalinos (CARVALHO, 2014).

O silício monocristalino (mono-Si) é uma tecnologia mais antiga, e sua eficiência fica em torno de 14 e 21% (IFC 2015; RABAIA et al., 2021). Painéis solares de silício monocristalinos (mono-Si) são facilmente reconhecíveis, pois possuem uma cor uniforme, normalmente azulado escuro, e cantos tipicamente arredondados. São constituídos de uma estrutura cristalina e homogênea, aí sua característica brilhante e uniforme, como mostrado na Figura 8 (CARVALHO, 2014; SIMON et al., 2019).

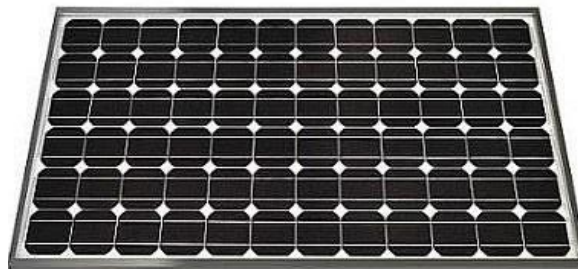


Figura 8: Painel solar fotovoltaico de silício monocristalino (PORTAL SOLAR, 2020).

Já no silício policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma preservando a formação de múltiplos cristais. De aparência heterogênea, é normalmente encontrado na cor azul, mas essa cor pode diferir em função do tratamento antirreflexivo empregado. Observa-se a presença de manchas em sua coloração devido o tipo do silício empregado, como mostra a Figura 9. Sua eficiência é de 13 a 17%, devido à baixa pureza do silício policristalino. Apesar disso, são mais

fáceis e baratos de produzir, pois não exigem tanta fidelidade com o grau de pureza (MESQUITA et al., 2019).



Figura 9: Painel solar fotovoltaico de silício policristalino (PORTAL SOLAR, 2020).

- Células de segunda geração ou filmes finos

Esses módulos são feitos com um filme fino, feitos por meio da deposição de um semicondutor em um substrato. Esta classe inclui semicondutores feitos de Silício amorfo (a-Si), Telureto de cádmio (CdTe), Seleneto de índio e cobre (CIS), e Di-seleneto de índio e cobre (gálio) (CIGS / CIS).

Essa tecnologia promete a diminuição do custo da célula, garantindo confiabilidade, durabilidade e flexibilidade. Por utilizar uma menor quantidade de materiais, ela reduz o consumo de energia no seu processo de fabricação em comparação com as células de primeira geração (LACROIX, 2013).



Figura 10: Filme fino (SILVEIRA, 2016).

A espessura das lâminas semicondutora é da ordem de 1 μm , o que possibilita, além do uso de pequenas quantidades de materiais por módulo, a utilização de plásticos e outros materiais de baixo custo para deposição do material semicondutor (LACROIX, 2013). As células solares de filmes finos possuem uma eficiência de conversão de energia de 22% a 29% (KHADIR, 2020).

- Células de terceira geração ou multijunção

São células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar, quando comparadas com as células baseadas em uma única camada semicondutora (*band-gap*). De modo geral, as células são altamente eficientes, possuem baixo custo/watt e utilizam materiais abundantes e de baixa toxicidade (ELY, SWART, 2014).

Segundo Ely e Swart (2014), diversas tecnologias são englobadas nessas células, embora haja uma tendência de incluir tecnologias orgânicas, pontos quânticos (PQs), células tandem/multijunção, células de portadores quentes (*hot carriers*), células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) e tecnologias de *upconversion*.

As células solares de múltiplas junções são os líderes atuais em eficiência e possuem usos comerciais na alimentação de satélites (BROWN, WU, 2009). Em 2003, uma junção tripla foi demonstrada com 36% de eficiência e, atualmente, células baseadas nessa tecnologia chegam a eficiências em torno de 68% (YAMAGUCHI, TAKAMOTO, ARAKI, 2006; BROWN, WU, 2009; GUO et al, 2015).

De acordo com Guo et al. (2015), eficiências na ordem de 68% (sem perdas resistivas) são alcançados por dispositivos de junção orgânicas tripla e híbridas. Células de junção tripla em série ou em paralelo com subcélulas orgânicas e perovskitas podem se tornar uma tecnologia essencial para avançar ainda mais o roteiro de eficiência das tecnologias fotovoltaicas existentes.

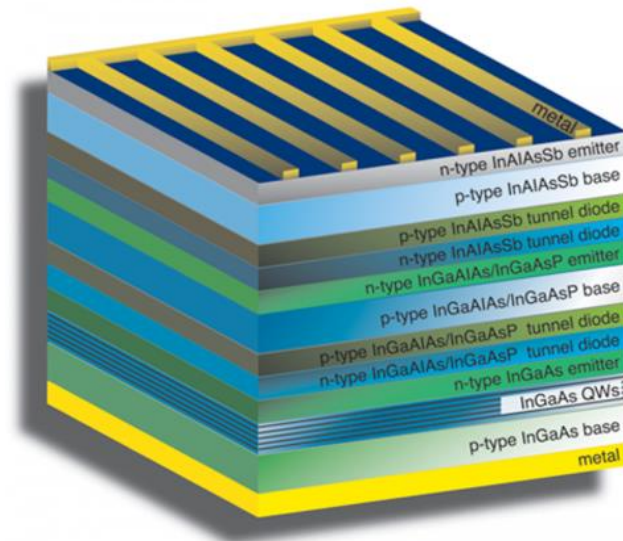


Figura 11: Célula de multi-junção (NAVAL RESEARCH LABORATORY, 2013).

▪ Tecnologias emergentes

Além das tecnologias citadas, existem outras diversas técnicas alternativas que visam custos de produção menores, aliados a maiores eficiências de conversão de energia. Como exemplos, temos células orgânicas e poliméricas, células fotoeletroquímicas sensibilizadas por corante (DSSC) e células de ponto quântico (QDSC) (CARVALHO, 2014). A Figura 12 apresenta um fluxograma sobre as classes de tecnologias FV.

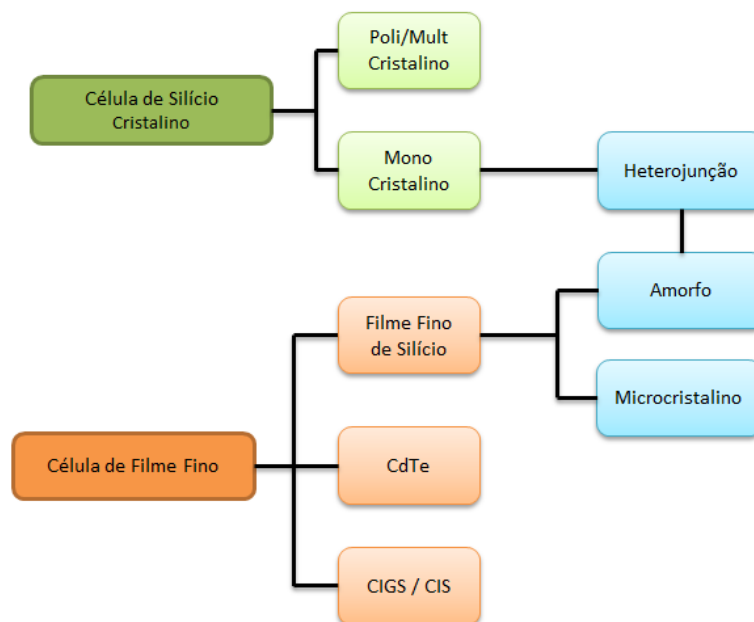


Figura 12: Classes de tecnologia FV (IFC, 2015).

2.4 Materiais e componentes dos módulos FV de 1ª Geração

Segundo Carneiro (2010), a potência máxima que é alcançada de uma única célula fotovoltaica não ultrapassa 3W, sendo insuficiente para a maioria das aplicações. Sendo assim, as células fotovoltaicas são normalmente agrupadas (ligadas em série) de modo a formar módulos fotovoltaicos, conforme esquematizado na Figura 13.

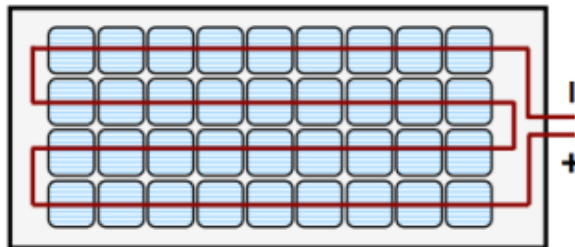


Figura 13: Ligação em série de 36 células voltaicas em um módulo (CARNEIRO, 2010).

Nessa ligação em série, os contatos frontais de cada célula são soldados aos contatos posteriores da célula seguinte, de forma a ligar o polo negativo (parte frontal) da célula com o polo positivo (parte posterior) da célula seguinte, conforme demonstra Figura 14 (CARNEIRO, 2010).

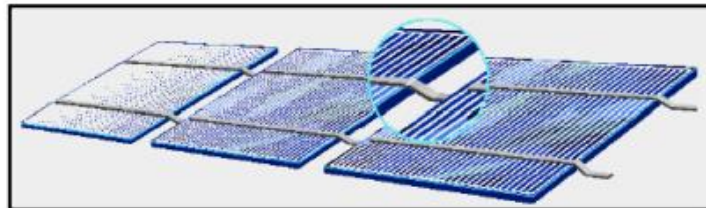


Figura 14: Contato frontal da célula soldada. (CARNEIRO, 2010).

Na produção dos módulos, é necessário dotá-los de características que lhes permitam resistir às condições ambientais adversas ao qual podem ser submetidos (IFC, 2015). Sendo assim, a fim de garantir a proteção contra a ação de esforços mecânicos, dos agentes atmosféricos e demais condições adversas, as células são normalmente revestidas com uma película de etileno acetato de vinilo (EVA). Trata-se

de um material flexível, translúcido e não refletor da radiação solar, que tem ainda a particularidade de assegurar o isolamento elétrico entre as células (CARNEIRO, 2010; CARVALHO, 2014).

Para dar rigidez à estrutura do módulo solar, são montados caixilhos de alumínio (leves e resistentes) e uma placa de vidro. A Figura 15 e a Tabela 2 apresentam, esquematicamente, os componentes e materiais normalmente utilizados na construção de módulos fotovoltaicos.

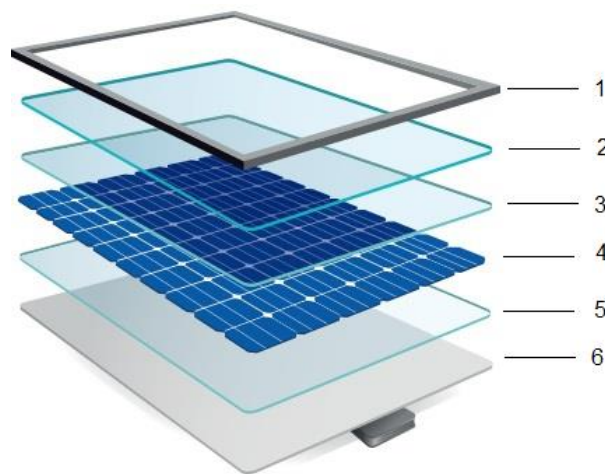


Figura 15: Componentes utilizados na construção de módulos fotovoltaicos (Adaptado de CLEAN ENERGY REVIEWS, 2018).

Tabela 2: Descrição das diferentes funções que compõem um módulo solar (CARNEIRO, 2010).

Componentes	Descrição
1	Caixilho Alumínio anodizado. Confere rigidez mecânica.
2	Vidro Vidro temperado. Permite a entrada de luz e protege as células contra impactos mecânicos (granizo, etc.).
3 e 5	Material de encapsulamento Película translúcida e não refletora da irradiação solar. O EVA garante também o isolamento elétrico das células.
4	Célula fotovoltaica Representa o elemento que converte a luz solar em corrente elétrica.
6	Isolante elétrico Protege a parte posterior do módulo e evita também entrada de água e outras substâncias.

A célula solar é um dispositivo cujo funcionamento se sustenta no efeito fotovoltaico, que consiste na conversão de energia luminosa incidente sobre materiais semicondutores em eletricidade (FALCÃO, 2005). As células solares consistem basicamente em duas camadas de material semicondutor, um tipo p e outro tipo n (FALCÃO, 2005; CARVALHO, 2014; YAMAMOTO, 2014).

A Figura 16 mostra, esquematicamente, o que ocorre numa célula fotovoltaica. Ao se incidir radiação luminosa no material, os elétrons na banda de valência (banda mais exterior do átomo) absorvem os fótons dessa radiação; sendo a energia dos fótons igual ou superior à energia da banda proibida (banda entre as bandas de valência e de condução), as ligações covalentes serão quebradas e esse elétron irá para a banda de condução (banda a qual o elétron se move livremente), gerando corrente elétrica (CRESESB, 2004; FALCÃO, 2005; CARVALHO, 2014).

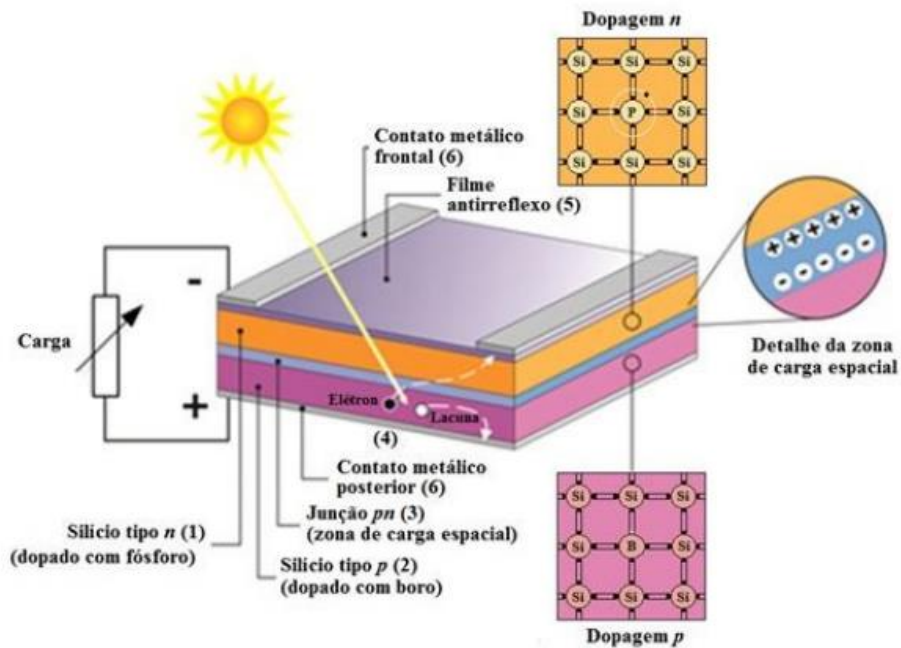


Figura 16: Estrutura básica de uma célula FV de silício destacando: (1) região tipo n ; (2) região tipo p ; (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos (CRESESB, 2014).

2.5 Métodos de produção do silício

O silício é um dos elementos mais abundantes no planeta, perdendo somente para o hidrogênio, o hélio, o neônio, o oxigênio, o nitrogênio e o carbono. A crosta terrestre é composta de 27,7% de silício (CETEM, 2007).

O silício (Si) é o elemento químico pertencente ao grupo 14 (IV-A) da Classificação Periódica dos Elementos, de número atômico 14 (14 prótons) e com massa atômica igual a 28u. Em temperatura ambiente, encontra-se no estado sólido, podendo apresentar-se tanto na forma amorfa quanto na forma cristalina, em estrutura octaédrica, de cor azul acinzentado e brilho metálico. É um elemento relativamente inerte e resistente à ação da maioria dos ácidos, mas reage com halogênios e bases (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

O silício transmite mais de 95% dos comprimentos de onda das radiações infravermelhas, estando presente em minerais como as argilas, os feldspatos e o quartzo, geralmente na forma de dióxido de silício ou sílica (SiO_2) e de silicatos (compostos contendo silício, oxigênio e metais). É o principal componente do vidro, do cimento e da cerâmica, da maioria dos componentes semicondutores eletrônicos e dos silicones (CGEE, 2009).

No setor industrial, a produção de silício se dá na forma de silício metálico (metalúrgico) ou na forma de liga ferrosilício, que corresponde por quase 95% da produção de silício. Os maiores produtores mundiais de ferrosilício são China, Rússia, Estados Unidos da América (EUA), Brasil e Ucrânia. Em relação ao silício metalúrgico, os maiores produtores são, respectivamente, China, Brasil, EUA, França e Noruega (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

O silício comercial (grau metalúrgico - SiGM) é obtido a partir de quartzo, quartzitos ou areias silicosas, utilizando coque de petróleo, carvão mineral ou vegetal como agentes redutores. A redução é realizada em fornos de arco elétrico com eletrodos de carbono submersos em temperatura superior a 1900°C (CETEM, 2007; CGEE, 2009; CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014). O silício líquido se acumula no

fundo do forno, de onde é retirado e resfriado. O silício produzido por esse processo apresenta um grau de pureza de até 99,5% (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

Para a fabricação de dispositivos semicondutores, é necessário um silício de pureza maior, que pode ser obtido por métodos físicos ou químicos. Os métodos físicos de purificação do silício metalúrgico baseiam-se na maior solubilidade das impurezas contidas no silício líquido, de forma que este se concentre nas últimas zonas solidificadas (CGEE, 2009).

O primeiro método, usado de forma limitada para construir radares durante a Segunda Guerra Mundial, consiste em moer o silício de modo que as impurezas se acumulem nas superfícies dos granulados, dos quais, por dissolução ácida, obtém-se um pó mais puro (CETEM, 2007).

O primeiro método usado em escala industrial foi o de fusão por zonas, o qual consiste em fundir a extremidade de uma barra de silício e, depois, deslocar lentamente o foco de calor ao longo da barra, de modo que o silício vai se solidificando com uma pureza maior, em razão do arrasto de grande parte das impurezas na zona fundida. O processo pode ser repetido diversas vezes até se obter a pureza desejada, cortando-se, então, a extremidade em que se acumulam as impurezas (CETEM, 2007).

Os métodos químicos de purificação do silício atualmente utilizados atuam sobre um composto, que se decompõe para a obtenção do silício de maior grau de purificação. Os compostos mais usados são o triclorossilano (HSiCl_3), o tetracloreto de silício (SiCl_4) e o silano (SiH_4) (WAN et al., 2020).

Outro processo de purificação usado é o processo Siemens. Nele, as barras de silício reduzido ou metalúrgico são expostas ao gás triclorossilano em um ambiente com temperatura de 1.150°C , fazendo com que o silício em barra se decomponha e se deposite com uma pureza aproximada de 99,9999999% (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

O silício resultante desse método, e por outros similares, apresenta uma fração de impurezas de uma parte por bilhão, sendo denominado silício policristalino. Esse tipo de silício pode ser produzido em diferentes graus de pureza, sendo o silício de grau eletrônico (SiGE) o que apresenta o mais alto grau de pureza (CETEM, 2007).

Além do silício policristalino, a indústria de painéis FV também lança mão do silício monocristalino. Apesar de ser mais eficiente que o policristalino, esse tipo de silício requer mais energia para sua produção, o que acaba elevando seu custo. Por esse motivo, a depender do que se deseja priorizar (custo ou eficiência) existem no mercado soluções fotovoltaicas tanto com SiGE, quanto com silício monocristalino.

Os módulos fotovoltaicos são formados por células, produzidas a partir dos wafers (lâminas) de silício cristalino, que, por sua vez, derivam de processos de cristalização (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014). A Figura 17 apresenta de forma simplificada as etapas percorridas pelo silício para obtenção do módulo FV.



Figura 17: Cadeia simplificada da indústria fotovoltaica (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014).

2.6 Índice Solarimétrico

O sol é a principal fonte de energia para o planeta. A radiação solar constitui-se de uma fonte virtualmente inesgotável de energia, havendo um enorme potencial de sua utilização através de sistemas de captação e conversão de energias (MME, 2008).

O planeta Terra, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve uma trajetória elíptica com uma excentricidade mínima de aproximadamente 0,017. Seu eixo apresenta uma inclinação ao plano normal da elipse de aproximadamente 23,45°. Essa inclinação, juntamente com seu movimento de translação, dá origem às estações do ano (CRESESB, 2014).

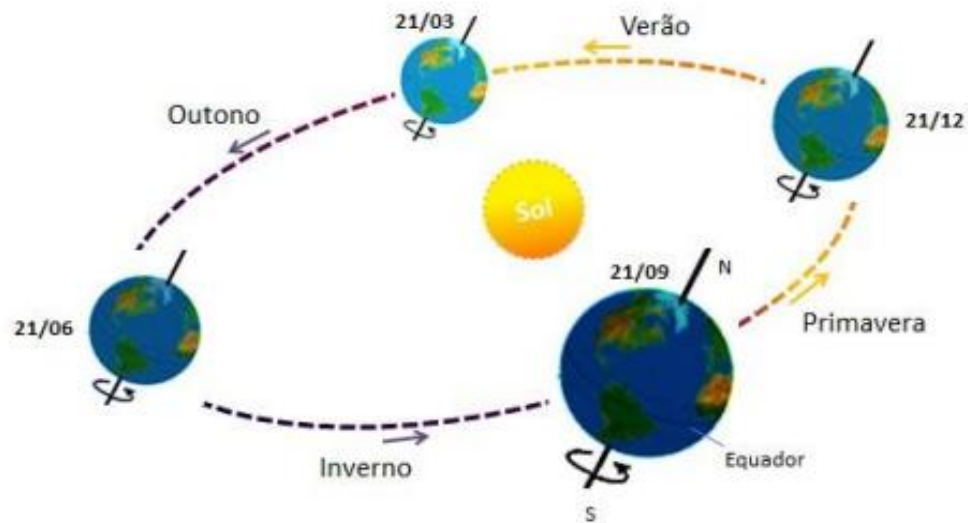


Figura 18: Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado em um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul (CRESESB, 2014).

A densidade média anual do fluxo energético proveniente da radiação solar medida em um plano perpendicular à direção de propagação dos raios no topo da atmosfera terrestre é chamada de constante solar, e sua unidade é dada em W/m^2 (CRESESB, 2014).

No Brasil, a radiação solar varia entre 8 e 22 $MJ/m^2 \cdot dia$, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, quando registram intensidade de radiação na faixa de 8 a 18 $MJ/m^2 \cdot dia$. Verifica-se também, neste trimestre (maio-junho-julho), que ocorre o centro de máxima radiação (18 $MJ/m^2 \cdot dia$) sobre uma vasta região compreendida entre leste do estado de Pará, oeste dos estados do Ceará e Bahia e a fronteira sul do estado da Bahia. A tendência de mínima (8 $MJ/m^2 \cdot dia$) ocorre ao sul do estado do Rio Grande do Sul (CRESESB, 2014). A Figura 19 mostra a irradiação global horizontal média anual do Brasil.

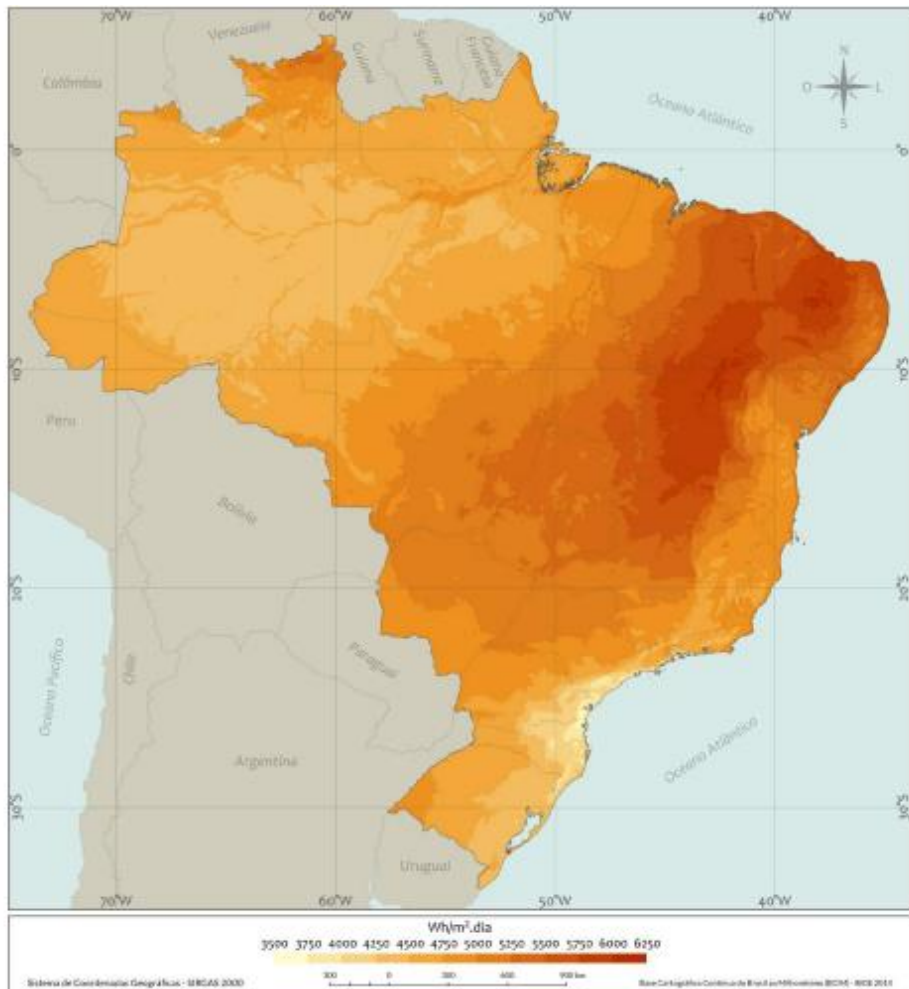


Figura 19: Mapa de radiação horizontal diária média anual do Brasil ($Wh/m^2 \cdot dia$) (INPE, 2017).

Na região norte, a insolação é menor nas áreas com maiores índices totais de precipitação (5h/dia à 6h/dia), como a parte da Amazonas e o estado do Amapá. No Nordeste, os valores elevados de insolação são explicados pela baixa nebulosidade, principalmente no sertão (7h/dia à 9h/dia). Na região centro-oeste, nas áreas onde ocorre maior quantidade de precipitação, os valores de insolação são baixos (FUNARI, TARIFA, 2017). A Figura 20 mostra a insolação diária média anual (horas) disponível no País.

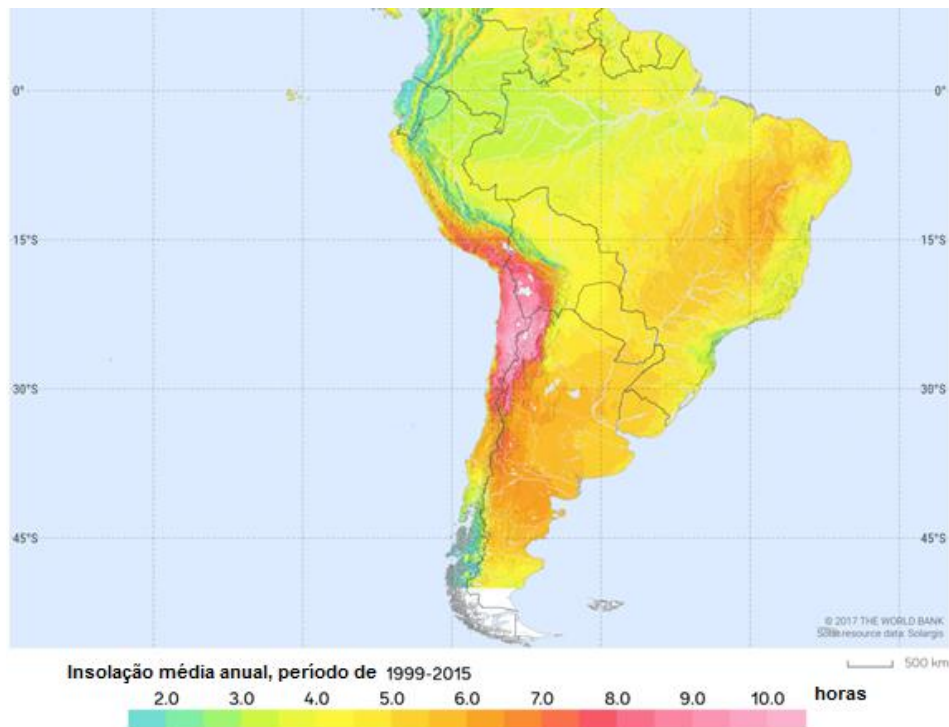


Figura 20: Mapa de insolação diária média anual (horas) (THE WORLD BANK, 2019).

Pode-se observar que o País tem um enorme potencial de irradiação e insolação disponível durante o ano todo, e em todos os Estados (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2000; CRESESB, 2014).

2.7 Emissões de GEE na Indústria Fotovoltaica

Diversas pesquisas indicam que, além dos problemas ambientais e mudanças climáticas, o aumento nas concentrações de CO₂ no ambiente, em breve, poderá acarretar vários problemas à saúde humana, tais como aumento de cânceres, distúrbios neurológicos e outras condições (ALDY, STAVINS, 2012; ASHRAFUZZAMAN, FURINI, 2019; ORIMOLOYE et al., 2019; MARAZZITI et al., 2021).

Sendo assim, muitos países industrializados estão lutando para limitar suas emissões de gases de efeito estufa de acordo com seus compromissos no âmbito do Acordo de Paris (COP21) e da Agenda 2030 (KAISER et al., 2020). Por anos, o Painel

Internacional sobre Mudanças Climáticas - IPCC destaca a importância de limitar e descarbonizar a demanda de energia para manter a elevação da temperatura média da terra abaixo de 1,5°C, tendo como base níveis pré-revolução industrial (IPCC, 2015). Com base em modelos de cenários, alguns especialistas pedem que, até 2050, a produção de energia deva ser totalmente descarbonizada; o que significa redução gradual do uso de combustíveis fósseis e aumento simultâneo de fontes de energia renováveis (ROGELJ et al., 2018).

Entre 1990 e 2008, o consumo mundial de energia aumentou em 40%. Em 2017, houve um aumento de 70% em relação aos níveis de 2010 (IEA, 2019b). A energia utilizada no mundo é majoritariamente originária a partir de fontes fósseis (i.e., carvão, gás natural e petróleo), com a geração de eletricidade correspondendo a 40% das emissões globais de CO₂ (TURCONI, BOLDRIN, ASTRUP, 2013).

Em se tratando de mensurar os impactos ambientais de um sistema solar que utiliza a tecnologia fotovoltaica, alguns estudos foram conduzidos a partir do uso da ACV. Wild-Scholten (2013) discorre sobre as emissões de carbono dos sistemas fotovoltaicos comerciais, baseando-se nos dados dos fabricantes de 2011 e nas estimativas dos fabricantes de equipamentos de 2013 para módulos “micromorfo” de silício.

As emissões de carbono equivalente foram: 38,1, 27,2, 34,8, 22,8, 15,8 e 21,4 gCO₂-eq/kWh na forma de silício cristalino, silício multicristalino, silício amorfo, silício “micromorfo”, telureto de cádmio e CIGS. A ACV foi calculada do “berço-ao-portão”, analisando as etapas de extração de materiais, fabricação e montagem do produto, excluídos as fases de instalação, operação, manutenção e fim de vida.

Feng et al. (2014) expõem que, entre 2000 e 2010, a produção de eletricidade da China aumentou três vezes e representou 12% das emissões globais de CO₂ em 2010. Os autores ainda demonstraram que trocando o carvão por tecnologias de geração de eletricidade renovável, poderia reduzir em 79% o total das emissões de CO₂ e em 50% o consumo de água usado na geração de eletricidade, quando comparado com o mix atual das fontes de geração de energia elétrica.

As emissões de CO₂ nas tecnologias fotovoltaicas variaram entre 9,4 e 217 gCO₂-eq/KWh, a média global de emissões dos módulos solares FV encontra-se em torno de 63.91 gCO₂-eq/kWh. A Tabela 3 mostra a avaliação feita pelos autores a partir de diversos estudos de caso estudados.

Tabela 3: Avaliação de ciclo de vida de diversos sistemas fotovoltaicos (FENG et al., 2014).

Tipo de célula	Tempo de vida (anos)	Emissões (g-CO₂/KWh)
FV amorfo solar	20	47
FV monocristalino	20	91
FV amorfo solar	-	50
Sistema nano-cristalizado	20	19-47
FV monocristalino	20	64.8
FV policristalino	30	12
FV policristalino	30	53.4
FV policristalino	-	104
FV monocristalino	25	217
FV monocristalino	24	165
FV monocristalino	30	44
FV amorfo solar	30	39
FV amorfo solar	30	15.6
FV amorfo solar	20	34.3
FV policristalino	30	9.4
FV policristalino	30	12.1

Hou et al. (2016) estudaram os impactos ambientais da geração de energia fotovoltaica a partir de silício cristalino conectada à rede elétrica na China. Os módulos solares foram investigados usando a avaliação do ciclo de vida (ACV). O consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa (GEE) durante cada processo foram estimados em detalhes. Os resultados mostraram que as emissões de GEE variam de 60,1 e 87,3 gCO₂-eq/kWh, dependendo do método de instalação. Cerca de 84% do consumo total de energia e emissão total de GEE correram durante o processo de fabricação do módulo fotovoltaico. A produção de silício de grau solar (SiGS) foi o processo que mais consumiu energia, representando, sozinho, por mais de 35% do consumo total de energia.

Lunardi et al. (2018a) e Lunardi et al. (2018b) fizeram estudo da ACV incluindo os impactos das matérias-primas necessárias para a produção das células e módulos até o final de sua vida. No entanto, os processos de reciclagem, bem como o transporte

não são considerados em sua análise. A unidade funcional (FU) foi definida como 1 kWh de geração direta energia elétrica atual do módulo fotovoltaico ao longo de sua vida útil. Os autores encontraram valores de GEE variando de 20g a 30 g-CO₂-eq / kWh.

Andler et al. (2020) estudaram a ACV “do berço ao túmulo” em diversas tecnologias de módulos solares FV, na forma de silício multicristalino, telureto de cádmio e CIGS. Os autores encontraram valores de GEE variando de 15g a 45 g-CO₂-eq / kWh.

Jia et al. (2020) realizaram uma análise completa do ciclo de vida "do berço ao túmulo" em um módulo multi-silício na China, dividindo seu ciclo de vida em Produção, Instalação, Uso e Fim de vida. Em termos de impacto ambiental, a etapa de produção teve o maior impacto no meio ambiente. Os autores encontraram valores de GEE em torno de 21 g-CO₂-eq / kWh. Além disso, eles identificaram que o tempo de retorno (*payback time*) desses equipamentos variaram entre de 1,16 e 2,06 anos.

Wang et al. (2020) utilizaram os indicadores de tempo de retorno (*payback time* - EPBT), taxa de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e tempo de retorno de carbono (CPBT). Os resultados mostram que o EPBT de 23 estações de energia foi de 0,79 a 1,94 anos, taxa de emissão de gases de efeito estufa estava entre 43,34 g e 106,78 g-CO₂-eq / kWh, e o intervalo do CPBT era entre 1,88 e 5,11 anos. Os autores expõem ainda que, mesmo em áreas com baixa radiação solar, os painéis FV ainda apresentam boa eficiência energética e benefícios ambientais. Em comparação com a geração de eletricidade a carvão tradicional, os painéis FV poderiam reduzir as emissões de carbono em 87,35% a 94,9%.

2.8 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida - ACV surgiu da necessidade de se relacionar uma metodologia que facilitasse a análise e identificação dos impactos ambientais referentes às atividades de uma empresa, incluindo seus produtos e processos. A partir de um

estudo de ACV, pode-se verificar que a prevenção à poluição se torna mais racional, econômica e efetiva do que uma ação nos efeitos gerados. Um dos objetivos da ACV é estabelecer uma sistemática confiável e que possa ser reproduzida a fim de possibilitar uma tomada de decisão que vise o menor impacto ambiental potencial (HINZ, VALENTINA, FRANCO, 2006; IBICT, CNI, 2014).

As normas NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009b) definem a ACV como uma técnica para a avaliação dos aspectos ambientais, bem como dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada de matérias-primas da natureza, que entram no sistema de produção, passando pela avaliação durante todo o processo produtivo até a disposição do produto, após ser consumido.

Dentro deste contexto, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) apresenta uma estrutura de uma ACV (Figura 21).

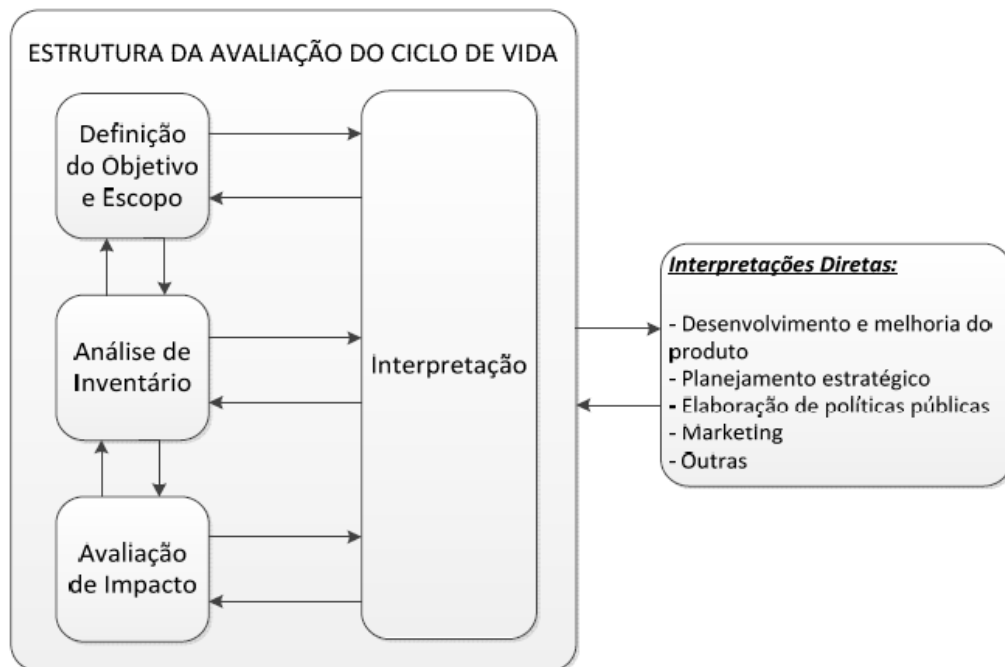


Figura 21: Etapas da ACV (ABNT, 2009a).

As principais etapas da ACV, segundo a norma (ABNT, 2009a), são descritas resumidamente a seguir:

- i. Definição do objetivo e escopo: O objetivo de um estudo da ACV deve declarar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo, o escopo de um estudo da ACV deve considerar a função do sistema de produto, a unidade funcional, os fluxos de referência, as fronteiras do sistema, as categorias de impacto ambiental e as limitações do estudo.

A unidade funcional é aquela que descreve quantitativamente o serviço prestado pelo sistema de produto estudado e serve como referência para todas as entradas e saídas do sistema (LAURENT et al., 2016).

O fluxo de referência pode ser descrito a medida das saídas de processos em um dado sistema de produto requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009a, 2009b; LAURENT et al., 2016).

As fronteiras do sistema definem quais partes do ciclo de vida e quais processos pertencem ao sistema analisado. Uma definição precisa das fronteiras do sistema é importante para assegurar que todos os procedimentos relevantes sejam incluídos no sistema modelado e que todos os impactos ambientais potenciais sejam abrangidos (IPEA, 2016).

- ii. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV): Esta envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Na medida em que os dados são coletados e é conhecido mais sobre o sistema, podem ser identificados novos requisitos ou limitações para os dados que requeiram uma mudança nos procedimentos de coleta de dados, levando a questões que requeiram revisões de objetivo ou do escopo do estudo.
- iii. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV): Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos, podendo haver correlação de dados de inventário por categorias de impacto, modelagem dos dados de inventário, e possível agregação dos resultados. Dentre os impactos comumente avaliados tem-se: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, acidificação, uso

da terra, escassez de recursos e toxicidade humana (FENG et al., 2014; GUO et al., 2015; ROSELI et al., 2019; RABAIA et al., 2021).

- iv. Interpretação do ciclo de vida: É a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinadas de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar as conclusões.
- v. Relatório: Os resultados, dados, métodos, suposições e limitações devem ser transparentes e apresentados com detalhe suficiente para permitir ao leitor compreender as complexidades e *trade-offs* inerentes ao estudo da ACV. O relatório é o documento final da ACV. O nível de detalhamento depende de alguns aspectos principais, tais como; o propósito e a aplicação do estudo, bem como o público-alvo. A revisão crítica deve ser realizada por profissionais que não participaram da execução do estudo da ACV (ABNT, 2009b).

Observando as etapas do ACV, percebe-se que é um processo iterativo, no qual são necessárias repetições para obter resultados mais consistentes, bem como maior confiabilidade dos dados coletados (ABNT, 2009b; BRANCO, 2012).

A ACV inclui etapas que vão desde a extração da matéria prima, concepção do design, construção, montagem e fim de vida útil do equipamento, sendo então calculados os impactos ambientais dos componentes, sendo estes; recursos minerais, recursos fósseis, recursos hídricos, bem como, destruição da camada de ozônio, uso da terra, acidificação, mudança climática, e toxicidade humana (ROSSI et al., 2020; RABAIA et al., 2021).

Essa metodologia pode ser usada em diferentes campos da atividade, no entanto, nos últimos anos, a produção de energia tornou-se um dos campos de aplicação mais importantes da ACV (DESIDERI et al., 2013; TURCONI, BOLDRIN, ASTRUP, 2013; WEIßBACH et al., 2013).

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

O presente trabalho utilizará a abordagem combinada, a qual lança mão de características tanto da abordagem qualitativa quanto da quantitativa (CRESWELL, 2009). A abordagem qualitativa busca dar significado aos fatos observados, o pesquisador se propõe a compreender e a interpretar as informações que ele seleciona, obtidas a partir de seu estudo ou pesquisa (JACOBSEN et al., 2017). A abordagem quantitativa é aquela na qual se pretende quantificar a variação de um fenômeno, situação ou problema, em busca de se determinar a magnitude dessa variação (KUMAR, 2011).

A abordagem combinada fornece evidências mais abrangentes para o estudo, ajuda a responder a questões que não podem ser respondidas por uma única abordagem isoladamente, e dá praticidade ao pesquisador para utilizar múltiplos métodos de pesquisa e de coleta de dados (CRESWELL, 2009).

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser definida como exploratória descritiva. De acordo com Lakatos e Marconi (2002), ela tem por finalidade descrever um determinado fenômeno, baseando em descrições quantitativas e/ou qualitativas, com observação participativa do pesquisador, sendo flexível quanto aos procedimentos de amostragem de modo a considerar os mais variados aspectos relativos ao objeto de estudo.

O método adotado neste trabalho foi de investigação por meio de um Estudo de Caso. De acordo com Voss, Tsiriktsis e Frohlich (2002), um estudo de caso é a descrição de um fenômeno ocorrido ou atual, elaborado a partir de diversas fontes de provas, que pode incluir dados da observação direta, entrevistas sistemáticas, bem como pesquisas em arquivos públicos e privados.

A primeira etapa do presente trabalho consistiu em um levantamento bibliográfico a respeito do tema em questão, visando compreender o estado da arte dos assuntos abordados na pesquisa (Capítulo 3.1), seguido da execução do estudo de ACV (Capítulos 3.2, 3.3 e 3.4).

3.1 Pesquisa Bibliográfica

Foi realizado um levantamento bibliográfico pela busca de artigos nacionais e internacionais com o objetivo de consultar a diversidade de publicações existentes e disponíveis sobre o tema abordado.

Inicialmente, com o intuito de dar sustentação aos objetos de estudo deste trabalho, foi realizado um levantamento na base de dados ScienceDirect. A escolha pelas publicações nessa base de dados se justifica pela tradição do debate acerca do conhecimento e do grau de impacto de seus periódicos no meio científico e acadêmico, bem como por configurar como um espaço consolidado que reúne produções científicas inéditas de diferentes países do mundo.

A busca no banco de dados abrangeu os anos de 2015 a 2021, e utilizou os termos de buscas “*photovoltaic solar energy*” e “*life cycle assessment*” no idioma inglês. A busca realizada ocorreu em: título, resumo, e palavras-chave. Como restrição foi definido a busca por artigos originais e artigos de revisão.

O objetivo desta etapa era selecionar até 20 artigos para servir de base para a elaboração da revisão da literatura (RAMOS, DURANTE, CALLEJAS, 2017). Para esse fim, realizou-se a leitura do título e do *abstract*, resultando na seleção de 16 artigos que mais se assemelhavam ao tema estudado.

Os artigos selecionados foram, então, lidos em sua integralidade e usados para dar robustez aos resultados e discussões. A Figura 22 apresenta o fluxograma simplificado da busca.

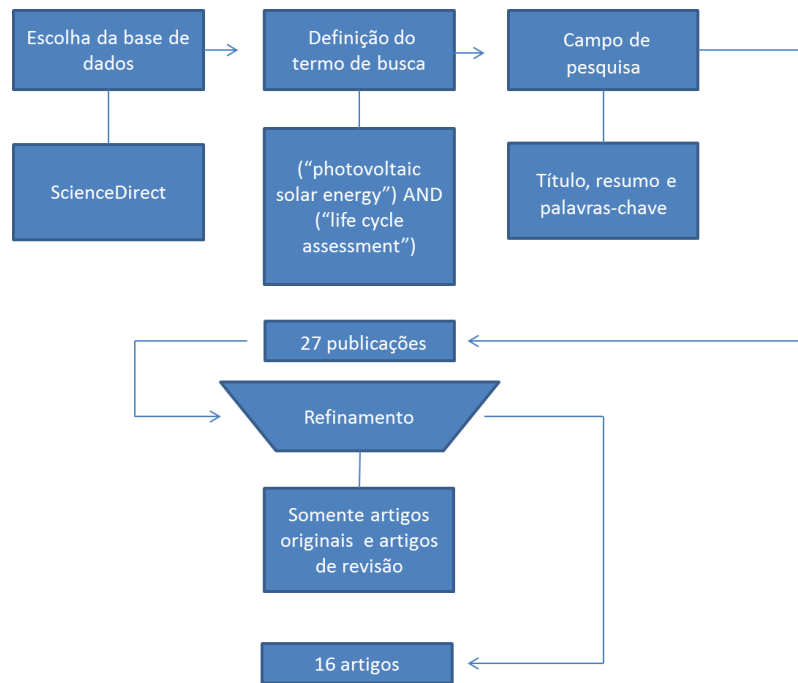


Figura 22: Fluxograma simplificado da revisão sistemática.

3.2 Definição do escopo

As etapas que integram um estudo de ACV já foram definidas na seção 2.8 do capítulo de Revisão de Literatura. Seguindo o passo a passo necessário para se desenvolver um estudo de ACV, definiu-se os seguintes critérios para o escopo:

- **Unidade Funcional:** A unidade funcional descreve a função primária do sistema estudado na ACV e será utilizada como referência para a entrada e saída de dados normalizados (BRANCO, 2012). Neste estudo, tem-se como unidade funcional de 1W de potência gerado por módulos solares FV, considerando seu ciclo de vida do berço-ao-portão (*cradle-to-gate*).

A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas dos módulos solares FV estudados;

Tabela 4: Especificações técnicas dos módulos 1, 2 e 3 utilizados no estudo.

Especificações	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Fabricante	KOMAES	DASOL	SIEMENS
Modelo	KM(P)20	DS-A18-10	SM60
Local de produção	Ningbo - China	Huzhou - China	Camarillo - EUA
Comprimento do módulo	500 mm	375 mm	1290 mm
Largura do módulo	350 mm	250 mm	350 mm
Potência máxima do módulo	20W	10W	50W
Voltagem na potência máxima	21,56V	18V	21,4V
Corrente na potência máxima	1,14A	0,56A	3,4A
Peso	2,3 kg	1,1 kg	5,4 kg

- Fluxo de Referência: O fluxo de referência se relaciona quantitativamente com todos os outros fluxos de entrada e de saída de um dado sistema de produto, para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009a). No presente trabalho o fluxo de referência à produção de um módulo FV completo.
- Abordagem de ciclo de vida: A abordagem utilizada para esse estudo de ACV foi a atribucional, pois contou com a utilização de dados médios de ICV para um sistema de produto em um período específico do tempo (WEIDEMA; EKVALL; HEIJUNGS, 2009; WEIDEMA et al., 2013).
- Definição das Fronteiras do Sistema: do berço-ao-protão (*cradle-to-gate*), desde a extração da matéria-prima até o vendedor de módulos solares (“portão do consumidor”), desconsiderando, uso e descarte do produto.
- Modelagem computacional do sistema: o presente estudo de ACV contou com o suporte do programa computacional SimaPro 8, software específico para esse fim. Ao iniciar o uso do software, criou-se um projeto chamado de “Placa solar” e definiu-se os parâmetros referentes à definição do escopo e objetivos.

Em seguida, definiu-se as entradas e saídas do sistema (Figura 23 e Tabela 5) e computou-se os valores de inventário obtidos a partir das ações definidas na etapa de ICV (Capítulo 3.3). Por fim, gerou-se os resultados de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV), conforme descrito no Capítulo 3.4.

Nome	Estado	Comentário
Placa solar	Nenhum	

Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	Min	Máx	Comentário
Steel, low-alloyed (GLO) market for APOS, U	5,4625	g	Indefinido				
Aluminium alloy, AlLi (GLO) market for APOS, U	242,3252	g	Indefinido				
Copper (GLO) market for APOS, U	21,15	g	Indefinido				
Bronze (GLO) market for APOS, U	2,1366	g	Indefinido				
Flat glass, uncoated (RoW) market for flat glass, uncoated APOS, U	665,63	g	Indefinido				
Polystyrene, general purpose (GLO) market for APOS, U	28,4301	g	Indefinido				
Synthetic rubber (GLO) market for APOS, U	44,0152	g	Indefinido				
Silicon, multi-si, casted (RoW) market for silicon, multi-si, casted APOS, U	162,43	g	Indefinido				
Polyurethane, flexible foam (RER) market for polyurethane, flexible foam APOS, U	0,0	g	Indefinido				
Brass (RoW) market for brass APOS, U	0,0	g	Indefinido				
(Insira linha aqui)							

Processos	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	Min
Metal working, average for steel product manufacturing (GLO) market for APOS, U	5,4625	g	Indefinido		
Metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO) market for APOS, U	242,3552	g	Indefinido		
Metal working, average for copper product manufacturing (GLO) market for APOS, U	21,15	g	Indefinido		
Injection moulding (GLO) market for APOS, U	28,4301	g	Indefinido		
Tempering, flat glass (GLO) market for APOS, U	242,3252	g	Indefinido		

Figura 23: Interface do software SimaPro e inserção de dados.

Tabela 5: Especificações dos fluxos de materiais e processos inseridos no SimaPro.

Materiais/Montagens	Unidade
Steel, low-alloyed (GLO) market for / APOS, U	g
Alumínio alloy, AlLi (GLO) market for / APOS, U	g
Copper (GLO) market for / APOS, U	g
Bronze (GLO) market for / APOS, U	g
Flat glass, uncoated (RoW) market for flat glass, uncoated / APOS, U	g
Polystyrene, general purpose (GLO) market for / APOS, U	g
Synthetic rubber (GLO) market for / APOS, U	g
Silicon, multi-si, casted (RoW) market for silicon, multi-si, casted / APOS, U	g
Polyurethane, flexible foam (RER) market for polyurethane, flexible foam / APOS, U	g
Brass (RoW) market for brass / APOS, U	g

Processos	Unidade
Metal working, average for steel product manufacturing (GLO) market for / APOS, U	g
Metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO) market for / APOS, U	g
Metal working, average for copper product manufacturing (GLO) market for / APOS, U	g
Injection moulding (GLO) market for / APOS, U	g
Contouring, brass (RoW) processing / APOS, U	g
Tempering, flat glass (GLO) market for / APOS, U	g
Transport, freight, light commercial vehicle (GLO) market group for transport, freight, light commercial vehicle / APOS, U	kg*km
Transport, freight, sea, container ship (GLO) market for transport, freight, sea, container ship / APOS, U	kg*km

- Analisar os resultados: É a interpretação dos resultados. Para além da avaliação dos dados de AICV para todas as categorias de impacto avaliadas, uma análise mais aprofundada será realizada com relação aos impactos referentes às emissões de gases do efeito estufa (Mudanças Climáticas), de modo a entender qual seria o custo envolvido para a produção de painéis solares com emissão líquida zero de CO₂-eq, por meio de compensação de carbono.
- Proposição de um *framework*: A partir dos resultados obtidos, propôs-se um *framework* para ser utilizado como base para avaliação ambiental para produção de módulos solares FV de 1ª geração.

3.3 Estudo de Inventário de Ciclo de Vida

Para a fase de ICV, foram feitos estudos experimentais a partir da desmontagem dos módulos solares FV selecionados, no sentido de identificar e quantificar os diversos componentes/materiais utilizados na fabricação, assim como identificar suas características e funções. Para esse fim, após a desmontagem dos módulos, realizou-se a medição de suas massas e análises de inventário.

As etapas de desmontagens seguiram os seguintes passos:

1. Remoção das esquadrias de alumínio;
2. Quebra e remoção do particulado de vidro;
3. Remoção de componentes eletrônicos, fiações e cabos;
4. Remoção da célula de silício;
5. Remoção de plásticos e borrachas.

Assim, os dados inventariados dos módulos FV estudados foram compostos por dados primários. O restante dos dados de ICV, necessários para a modelagem das outras etapas do ciclo de vida dos componentes (e.g., extração de matéria prima, processamento, transporte etc.) foram compostos por dados secundários, a partir da base de dados da Ecoinvent (disponível no software SimaPro).

Além disso, fez-se a modelagem do transporte de três dos elementos com maior participação na composição mássica dos painéis, i.e., vidro, alumínio e o silício de grau solar, até o produtor de módulos solares UV, bem como do módulo finalizado até um vendedor de módulos fictício localizado no Brasil:

- Para o fornecimento de vidro, definiu-se como fornecedora a empresa que transforma o carbonato de cálcio, o dióxido de silício e o carbonato de sódio em vidro. No caso do alumínio, considerou-se como fornecedora a empresa que realiza a fundição do alumínio. Por fim, considerou-se como fornecedora de silício grau solar a empresa que produtora desse tipo de material;
- A produção dos três materiais foi realizada por fornecedoras localizadas no país de origem do módulo solar FV e, quando possível, em locais próximos à planta produtora do módulo;
- Para todos os módulos estudados, definiu-se que o transporte dos materiais até as plantas produtoras de módulos solares FV foi realizado por modal rodoviário, por meio de caminhões a diesel.
- Uma vez produzido o módulo, considerou-se o seu transporte até o porto mais próximo à sua planta produtora, também por modal rodoviário e por meio de caminhões a diesel.
- Para o frete até o Brasil, considerou-se o transporte internacional por modal marítimo, a partir de navios cargueiros, do porto do país de origem até o porto de Santos (Brasil). Por fim, do Porto de Santos, considerou-se o frete dos módulos por modal rodoviário, feito por meio de caminhões a diesel, até um vendedor fictício de módulos solares na cidade de Piracicaba/SP.

Os fornecedores de vidro, alumínio e silício grau solar, bem como os produtores de módulos solares FV e os portos considerados para cada módulo são apresentados pela Tabela 7. As rotas, fretes e distâncias estimadas para cada etapa do transporte são apresentados pela Tabela 7.

Tabela 6: Identificação e endereços dos fornecedores de vidro, alumínio e silício grau solar, dos produtores de módulos solares FV e dos portos utilizados para a simulação dos fretes

Módulo	Tipo de Fornecedor/Porto	Nome do Fornecedor/Porto	Endereço
1	Produtor de Vidro	Ningbo Yinzhou Dongqiao Qunxing Glass Factory	Dongqiao Town, Ningbo, Zhejiang, China
	Fundição de Alumínio	Ningbo Bonarich Aluminium Co Ltd.	Long Zhen Da Dao, Cixi, Ningbo, Zhejiang, China
	Produtor de Silício Grau Solar	Jiangsu Shunfeng Photovoltaic Technology Co Ltd.	99 Yanghu Rd, Wujin District, Changzhou, Jiangsu, China
	Fabricante do Módulo	Ningbo Komaes Solar Technology Co Ltd.	Jifeng Road, Jifeng Rd, Yinzhou, Ningbo, Zhejiang, China
	Porto mais próximo	Porto de Jiaxing	Jiaxing Port, Pinghu, Jiaxing, Zhejiang, China
2	Produtor de Vidro	Ningbo Yinzhou Dongqiao Qunxing Glass Factory	Dongqiao Town, Ningbo, Zhejiang, China
	Fundição de Alumínio	Ningbo Bonarich Aluminium Co Ltd.	Long Zhen Da Dao, Cixi, Ningbo, Zhejiang, China
	Produtor de Silício Grau Solar	Jiangsu Shunfeng Photovoltaic Technology Co Ltd.	99 Yanghu Rd, Wujin District, Changzhou, Jiangsu, China
	Fabricante do Módulo	Anji DaSol Solar Energy Science & Technology Co Ltd.	Anji Economic Development Zone Health Industrial Park, Huzhou, Zhejiang, China
	Porto mais próximo	Porto de Jiaxing	Jiaxing Port, Pinghu, Jiaxing, Zhejiang, China
3	Produtor de Vidro	Industrial Glass Products Inc.	4229 E. Union Pacific Ave, Los Angeles, CA 90023, Estados Unidos
	Fundição de Alumínio	Kaiser Aluminum and Chemical Company	6250 Bandini Blvd, City of Commerce, CA 90040, Estados Unidos
	Produtor de Silício Grau Solar	Siemens - Siemens Solar Industries	4650 Adohr Lane, Camarillo, CA 93012, Estados Unidos
	Fabricante do Módulo	Siemens Solar Industries	4650 Adohr Lane, Camarillo, CA 93012, Estados Unidos
	Porto mais próximo	Porto de Hueneme	333 Ponoma Street Port Hueneme, CA 93041, Estados Unidos

Tabela 7: Distância do frete das indústrias produtoras de vidro, alumínio e silício grau solar até o site de produção do módulo solar FV e distância do frete da fábrica até um vendedor de módulos solares em Piracicaba/SP.

Módulo	Frete Pré-Produção por Fornecedor	Distância do fornecedor à fábrica [km] ^a	Frete Pós-Produção	Distância da fábrica até o porto mais próximo [km] ^a	Transporte Marítimo [km] ^b	Transporte do Porto de Santos/SP até Piracicaba/SP [km] ^a
1	Vidro Ningbo/ZJ → Ningbo/ZJ	20	Rodoviário (China) Ningbo/ZJ → Porto de Jiaxing/ZJ	120	20.220	240
	Alumínio Ningbo/ZJ → Ningbo/ZJ	50	Marítimo (International) Porto de Jiaxing/ZJ (CN) → Porto de Santos/SP (BR)			
	Silício grau solar Changzhou/JG → Ningbo/ZJ	320	Rodoviário (Brasil) Santos/SP → Piracicaba/SP			
2	Vidro Ningbo/ZJ → Huzhou/ZJ	240	Rodoviário (China) Huzhou/ZJ → Porto de Jiaxing/ZJ	170	20.220	240
	Alumínio Ningbo/ZJ → Huzhou/ZJ	250	Marítimo (International) Porto de Jiaxing/ZJ (CN) → Porto de Santos/SP (BR)			
	Silício grau solar Changzhou/JG → Huzhou/ZJ	160	Rodoviário (Brasil) Santos/SP → Piracicaba/SP			
3	Vidro Los Angeles/CA → Camarillo/CA	100	Rodoviário (EUA) Camarillo/CA → Porto de Hueneme/CA	20	13.590	240
	Alumínio Commerce/CA → Camarillo/CA	100	Marítimo (International) Porto de Hueneme/CA (EUA) → Porto de Santos/SP (BR)			
	Silício grau solar^c	-	Rodoviário (Brasil) Santos/SP → Piracicaba/SP			

^aFonte: Google Maps (2021); ^bFonte: SEARATES (2021); ^cPara o Módulo 3, considerou-se que a produção do silício grau solar é feita na mesma planta da montagem do módulo solar.

3.4 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

Para traduzir os fatores de impactos ambientais em números, são utilizados dois fatores de distintos: os de ponto médio “*midpoint*” e os de ponto final “*endpoint*”. A abordagem do ponto médio tem uma relação mais forte com os fluxos ambientais e uma incerteza relativamente menor que a do ponto final (HAUSCHILD, HUIJBREGTS, 2015). Por este motivo, foram escolhidos fatores de ponto médio para a caracterização dos resultados de AICV do presente estudo.

O método de avaliação de impactos ambientais ReCipe 2016 Midpoint (H) foi selecionado por ser um método muito utilizado para ACV em sistemas de energia no Brasil, incluindo sistemas de energia solar FV, como realizado no estudo de Leandro (2019). Das diferentes categorias presentes no ReCipe 2016 Midpoint 1.13 (H), 18 delas foram avaliadas:

- Consumo de água;
- Eutrofização da água doce;
- Eutrofização marinha;
- Radiação ionizante;
- Escassez de recursos minerais;
- Escassez de recursos fósseis;
- Ecotoxicidade terrestre;
- Ecotoxicidade da água doce;
- Ecotoxicidade marinha;
- Depleção da camada de ozônio;
- Toxicidade humana;
- Danos à saúde humana;
- Uso da terra;
- Acidificação terrestre;
- Mudanças climáticas;
- Formação de partículas finas;
- Formação fotoquímica de ozônio.

Na categoria de impacto consumo de água, são avaliadas as entradas referentes ao consumo de água durante toda cadeia produtiva do equipamento analisado, ou do processo, em m³ de água consumida (ALVES, 2018).

A eutrofização aquática pode ser definida como o enriquecimento de nutrientes do ambiente aquático (GOEDKOOPEL al., 2009). Dentre os males causados pela eutrofização, destacam-se a proliferação acelerada de macrófitas aquáticas e algas que podem produzir substâncias tóxicas nocivas à saúde (BARRETO et al., 2013).

A radiação ionizante é a radiação capaz de “arrancar” um elétron de um átomo (OKUNO, 2013). A exposição prolongada à radiação ionizante pode causar diversos danos à saúde humana, tais como efeitos cancerígenos e hereditários (GOEDKOOPEL al., 2009).

Além das questões de escassez de recursos naturais, a exploração de recursos minerais e fósseis provoca a degradação ambiental da área explorada, ameaçando a existência de espécies animais e vegetais (OLIVEIRA et al., 2017).

A caracterização para a ecotoxicidade leva em consideração a persistência ambiental (destino), bem como a acumulação na cadeia alimentar (exposição) e a toxicidade de um químico (efeito). Os fatores de caracterização têm diferentes pesos para os fatores de efeito, exposição e destino, levando em conta as espécies de animais expostas, químico liberado e o ambiente no qual o efluente ou produto é descartado (GOEDKOOPEL al., 2009).

A depleção da camada de ozônio ocorre devido a perdas fugitivas de substâncias antropogênicas que persistem na atmosfera. O ozônio estratosférico representa 90% do ozônio total da atmosfera, é vital para a vida, pois bloqueia a entrada da radiação ultravioleta (UV) para a superfície do planeta. Se não for absorvida, a radiação UV abaixo de 300 nanômetros chegará à troposfera e à superfície da terra, onde pode aumentar o risco de câncer de pele e catarata à saúde humana. Também pode causar envelhecimento prematuro e supressão do sistema imunológico, além de danificar a vida vegetal terrestre e os ecossistemas aquáticos (FAHEY, 2002).

O Potencial de Toxicidade Humana é um índice que reflete o dano potencial para um humano a partir de uma unidade de produto químico liberado no meio ambiente,

baseado na toxicidade inerente de um composto e sua dose potencial. Como exemplo, compostos e elementos químicos como arsênio, dicromato de sódio e fluoreto de hidrogênio (gerados durante a produção de eletricidade a partir de fontes fósseis), são produtos químicos potencialmente perigosos para humanos por inalação, ingestão e até mesmo contato, podendo causar alguns tipos de cânceres (ACERO, RODRÍGUEZ, CIROTH, 2015).

A categoria de impacto do uso da terra reflete os danos aos ecossistemas devido aos efeitos da ocupação de uma determinada área de terra durante um determinado tempo; sua transformação e seus danos causados ao ecossistema (GOEDKLOOPET al., 2009).

A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos e fosfatos, causam alterações na acidez do solo. Para quase todas as espécies de plantas, existe um limite máximo de acidez com o qual seu desenvolvimento e sobrevivência não são comprometidos. Um desvio relevante desse valor é denominado de acidificação, e pode ser prejudicial às espécies. As principais emissões acidificantes são óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃) e dióxido de enxofre (SO₂) (GOEDKLOOPET al., 2009).

As mudanças climáticas são responsáveis por uma série de consequências ambientais que afetam tanto a saúde humana quanto a dos ecossistemas. Alguns de seus efeitos diretos são ondas de calor, poluição do ar e dispersão de aeroalérgenos. Além disso, doenças infecciosas (transmitidas por vetores ou pela água) e desnutrição podem ser considerados efeitos indiretos gerados das mudanças climáticas (GOEDKLOOPET al., 2009).

O material particulado fino com diâmetro inferior a 10 µm (PM₁₀) representa uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas. O PM₁₀ causa problemas de saúde, pois atinge a parte superior das vias respiratórias e os pulmões quando inalado. A inalação de diferentes tamanhos de partículas pode causar diversos problemas de saúde, e podem provocar a diminuição da expectativa de vida (GOEDKLOOPET al., 2009).

A formação do ozônio é o produto de complexas reações químicas e fotoquímicas que ocorrem na atmosfera. Em determinadas condições meteorológicas, principalmente quando há incidência de raios ultravioletas, ocorrem reações com o NO_2 e liberam oxigênio no estado excitado que pode reagir com o oxigênio molecular, encontrado na atmosfera, formando o ozônio (ROMERA et al., 2018). O ozônio próximo à superfície terrestre pode causar danos à vegetação, agindo como inibidor da fotossíntese e produzindo lesões características em vegetações. Além disso, ele é considerado um causador ou agravante de problemas respiratórios à saúde humana (MMA, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados do trabalho, seguindo o que foi proposto na metodologia. Como resultado inicial, tem-se uma análise da manufatura dos módulos solares fotovoltaicos, de uma maneira geral, analisando os possíveis impactos desta cadeia no meio ambiente.

4.1 Resultados de ICV da desmontagem dos módulos FV

As Figuras 24, 25 e 26 representam as etapas de desmontagem dos módulos estudados e Tabelas 8, 9 e 10 descrevem as relações dos itens que os constituem, bem como os resultados da pesagem de cada item.



Figura 24: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 1.

Tabela 8: Relação de itens que constituem o módulo FV 1.

Item	Massa (g)	Quantidade (-)	Massa total (g)
Placa solar 345x495 mm	318,42	1	318,42
Esquadria de alumínio 500x28 mm	177,09	2	354,18
Esquadria de alumínio 350x28 mm	136,6	2	273,2
Vidro	1302,12	1	1302,12
Plástico cabo Ø 2,5x1330 mm	7,31	2	14,62
Cobre cabo Ø 2,5x1330 mm	8,21	2	16,42
Ponta de solda	0,2	4	0,81
Borracha do cabo Ø 6x1240 mm	38,54	1	38,54
Anel de borracha cabo Ø 10x6 mm	0,31	1	0,31
Borracha ponta do cabo Ø 6x9 mm	0,07	1	0,07
Chapa de aço soldada 25x8 mm	1,92	2	3,84
Parafuso aço d 3,3 mm	0,65	2	1,3
Parafuso latão Ø 4,8 mm	0,89	2	1,79
Sextavado plástico 15x3,3 mm	0,28	1	0,28
Ponta plástica do sextavado	0,79	1	0,79
Conexão plástica do sextavado Ø 15x25 mm	1,81	1	1,81
Caixa plástica 19x61x61 mm	23,4	1	23,4
Chapa de bronze 8x8x1 mm	0,39	2	0,78
Total			2352,71



Figura 25: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 2.

Tabela 9: Relação de itens que constituem o módulo FV 2.

Item	Massa (g)	Quantidade (-)	Massa total (g)
Parafuso conexão Ø 3x5,7 mm	0,36	4	1,45
Suporte parafuso	1,34	1	1,34
Tampa superior conexão 50x40x1,3 mm	4,19	1	4,19
Parafuso conexão Ø 2,4x6 mm	0,18	4	0,74
Peça de bronze da conexão 10x4x5 mm	0,6	2	1,21
Peça plástica conexão 16x16x13,7 mm	0,95	1	0,95
Borracha proteção cabo Ø 7x35 mm	0,48	2	0,96
Peça bronze tampa inferior d5x3 mm	0,23	4	0,93
Esquadria de alumínio 18x250 mm	51,83	2	103,66
Esquadria de alumínio 16x375 mm	68,96	2	137,92
Placa solar 245x1x365	162,43	1	162,43
Tampa inferior 50x40x4 mm	7,09	1	7,09
Vidro	665,63	1	665,63
Peça de solda conexão da tampa 23x1x10 mm	1,33	2	2,66
Borracha cabo Ø 7x1300 mm	43,05	1	43,05
Ponta de solda	0,22	2	0,45
Plástico cabo preto/azul Ø 2,5x1300 mm	7,74	2	15,48
Cobre do cabo	10,57	2	21,15
Plástico indicador-cabo 6x18,8 mm	0,35	2	0,7
Cartolina indicativa 1,4x18 mm	0,02	2	0,03
Total			1172,06



Figura 26: Etapas do processo de desmontagem do módulo FV 3.

Tabela 10: Relação de itens que constituem o módulo FV 3.

Item	Massa (g)	Quantidade (-)	Massa total (g)
Placa solar 330 x 1290 mm	788,3	1	788,3
Esquadria de alumínio 330 x 35 mm	70,71	2	141,42
Esquadria de alumínio 1290 x 35 mm	517,84	2	1035,68
Vidro	3355,63	1	3355,63
Caixa plástica 64 x 80 x 22 mm	29,1	2	58,2
Tampa caixa plástica 64 x 80 x 6 mm	16,21	2	32,42
Haste de metal 33 x 5 x 1 mm	0,28	4	1,12
Parafuso com chapa 12 x 12 x 12 mm	3,36	2	6,72
Chapa de metal dobrada	3,73	4	14,92
Espuma contato material elétrico 40 x 15 x 5 mm	1,46	2	2,92
Parafuso metal Ø 2 x 16 mm	1,05	4	4,2
Parafuso metal Ø 3 x 11 mm	0,76	8	6,08
Componente elétrico Ø 7 mm	1,55	2	3,1
Plástico lacre segurança	0,07	2	0,15
Plástico conexão chapa Ø 4 x 8 mm	0,14	2	0,29
Total			5451,16

A Tabela 11 apresenta os materiais, massa em grama (g) e respectiva percentagem (%) dos módulos solares FV estudados. Por módulo solar FV, entende-se todo o conjunto de componentes montados em uma única placa solar.

Tabela 11: Componentes dos módulos solares FV, em grama (g) e percentagem (%).

Materiais	Módulo 1		Módulo 2		Módulo 3		Reciclável
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)	
Aço	5,14	0,22	5,46	0,46	33,04	0,61	Sim
Alumínio	627,38	26,67	242,32	20,67	1177,1	21,59	Sim
Cobre	16,42	0,7	21,15	1,80	-	-	Sim
Bronze	0,78	0,03	2,13	0,17	-	-	Sim
Vidro	1302,12	55,35	665,63	56,78	3355,63	61,56	Sim
Plástico	40,91	1,74	28,43	2,42	91,075	1,67	Sim
Borracha	38,92	1,65	44,01	3,75	-	-	Sim
Latão	1,79	0,08	-	-	-	-	Sim
Espuma	-	-	-	-	2,92	0,05	Não
Silício	318,42	13,53	162,43	13,85	788,3	14,46	Sim
Rejeitos	0,8132	0,03	0,45	0,4	3,1	0,06	Não
Total	2352,71	100	1172,06	100	5451,16	100	-

Conhecendo o processo de manufatura dos componentes que compõem um módulo solar FV, assim como os impactos oriundos desses processos, é importante buscar identificar a quantidade de material presente nesses equipamentos que é

passível de reciclagem, uma vez que para o sucesso no descarte adequado desses materiais é necessário que eles gerem o mínimo de prejuízo possível para o meio ambiente. Nesse sentido, foi levantada uma discussão referente às etapas produtivas dos principais componentes que constituem os módulos solares FV, representando pelo menos 95% de sua massa total.

O processo de produção e purificação do silício foi descrito no Capítulo 2.5, o consumo de energia necessária nos processos convencionais para obtenção do silício grau solar é de 20-50 kWh/kg (BYE, CECCAROLI, 2014; CHEN et al., 2019). Para sua purificação para silício de grau eletrônico, por meio do processo Siemens o consumo de energia é de 130 kWh/kg, com uma geração de carbono de 43 kgCO₂/kg (COXON et al., 2015).

A fusão é o processo de conversão de lingotes de alumínio em alumínio fundido, que requer a adição de uma pequena quantidade de elementos de liga, podendo ser eles; Mg, Fe, Si, Cu, Zn entre outros, sendo que o alumínio corresponde por mais de 98% dessa composição (WANG et al., 2021).

O derretimento é o processo de purificação do Al, e a energia teórica necessária para derreter 1 tonelada de liga de alumínio é de aproximadamente 1185MJ/tAl. As emissões do processo de fusão vêm principalmente de gás residual da combustão de combustível fóssil (WANG et al., 2021).

O resíduo sólido produzido no processo de fundição é principalmente sucata e escória de alumínio. As sucatas de alumínio podem ser reutilizadas diretamente como insumo de matéria-prima após tratamento simples (TAWFIK, NEMAT-ALLA, DEWIDAR, 2021).

O forno de homogeneização de tarugo de alumínio é usado para a homogeneização de ligas de alumínio, que é o tratamento térmico de alta temperatura (450-600 ° C) realizado após fundição (TAWFIK, NEMAT-ALLA, DEWIDAR, 2021). Para o processo de extrusão, a energia necessária para dar a forma do perfil do alumínio (esquadrias de alumínio da placa solar) é de 13,5 MJ / kg (BAFFARI et al., 2019).

Em seu estudo, Wang et al. (2021) mostraram que a extração e a produção de matérias-primas do alumínio causaram o maior impacto ambiental, respondendo por 93,9% do impacto ambiental total da produção do alumínio.

Além disso, a literatura afirma que para fundir novamente e reciclar o alumínio secundário é necessário entre 5% e 10% da energia usada para produzir metal primário (BROUGH, JOUHARA, 2020).

O vidro é obtido pela mistura homogênea e fusão de três matérias-primas: o carbonato de cálcio (CaCO_3), o dióxido de silício (SiO_2) e o carbonato de sódio (Na_2CO_3). Depois de derretido a uma temperatura de aproximadamente 1200 °C, as gotas de vidro são transferidas para moldes de ferro fundido por meio de guias de queda especiais e, com o efeito combinado de vácuo e de ar comprimido, o recipiente de vidro é formado.

Os recipientes de vidro, então, passam por um tratamento de superfície para melhorar a resistência mecânica: é necessário prosseguir com recozimento, que consiste em um aquecimento até 550 °C e um resfriamento lento à temperatura ambiente até estar pronto para uso (VINCI et al., 2019). O consumo de energia para a produção do vidro é de 17.98 MJ/kg (CAMARATTA, VOLKMER, OSORIO, 2020). De acordo com Vinci (2019), as emissões mais relevantes durante o processo de produção desse material estão relacionadas às emissões na atmosfera de CO_2 , variando 0,5 e 1,4 kg CO_2 /kg de vidro.

A borracha natural começa com a extração do látex da seringueira "*Hevea brasiliensis*", passando, em seguida, por um processo de formulação, que é a incorporação dos ingredientes e substâncias auxiliares (tais como a sílica e o negro de fumo). O consumo de energia requerida é de 480 MJ para produzir 1 kg de borracha natural (REN et al., 2020).

Observa-se que a maioria dos componentes/materiais do módulo solar FV é passível de reciclagem, ou seja, já foram desenvolvidos meios de se reaproveitar esses materiais no processo de Manufatura Reversa desses equipamentos, independente se for para a venda como matéria prima secundária ou para seu reaproveitamento em novos produtos com as mesmas funções.

Um relatório divulgado pelo IRENA (2016) fornece uma projeção de todos os volumes futuros de resíduos de painéis solares fotovoltaicos. Estima-se que até 2050, os resíduos de painéis solares fotovoltaicos (compostos principalmente por vidro) possam totalizar 78 milhões de toneladas. Se totalmente reinseridos à cadeia produtiva, o valor do vidro recuperado e de outras matérias-primas poderá exceder US\$ 15 bilhões em 2050. Caso esse material seja reaproveitado para a construção de novas unidades, ele viabilizaria a produção de 2 bilhões de novos painéis.

Dias et al (2021) realizaram estudos para reciclagem dos materiais que compõem os módulos FV. Segundo os autores, o primeiro passo para a reciclagem é a desmontagem do módulo, a partir da remoção do vidro, seguido pela remoção do material encapsulante, este realizado por meio de delaminação térmica, química ou mecânica.

O projeto europeu de recuperação total fotovoltaica em fim de vida (FRELPA) consiste em um sistema automatizado que desmonta a moldura de alumínio e desconecta os cabos dos módulos, seguido por um processo de aquecimento e corte usando uma faca de alta frequência para separar o vidro do módulo solar FV, formando um laminado. O laminado é então reduzido em tamanho por corte e colocado em um forno para incineração, que produz cinzas contendo silício e outros metais. A cinza é peneirada para se recuperar alumínio e, em seguida, lixiviada para se recuperar o silício, a prata e o cobre (o primeiro por filtragem e os dois últimos por eletrólise - LATUNUSSA et al., 2016).

Os resíduos de processos de reciclagem de módulos solares FV podem ter impactos ambientais nocivos (ARDENTE, LATUNUSSA, BLENGINI, 2019). Os principais impactos ambientais decorrem dos processos de incineração do polímero e recuperação de metais (LATUNUSSA et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2020). Xu et al. (2018) mencionam a possível emissão de solventes durante certos processos de reciclagem. De acordo com Huang et al. (2017), apesar de os tratamentos térmicos e químicos nos processos de reciclagem de módulos solares FV gerarem impactos ambientais, estes ainda são menores do que os de disposição dos módulos em aterros.

Uma alternativa ao processamento térmico de todo o módulo é ter uma etapa de pré-tratamento que separe os macros componentes dos módulos FV de outros resíduos, diminuindo, assim, a entrada de material no processamento térmico. Uma técnica utilizada para realizar o pré-tratamento pode ser a separação manual, mecânica ou por meio do uso de solventes orgânicos (DIAS et al. 2021).

Tokoro, Nishi e Tsunazawa (2021) expõem que um processo físico simples pode ser a utilização de um moinho excêntrico para moer seletivamente o vidro, separando o vidro da resina e concentrando o vidro em um grupo de tamanho de partículas menores.

Os quadros de alumínio desmontados e os fios de cobre também podem ser reutilizados diretamente ou enviados para instalações de produção de matéria-prima secundária. Os plásticos do cabo e da caixa de junção são submetidos a um processo térmico subsequente (incineração) ou descartados em aterros (SEO, KIM, CHUNG, 2021). Além disso, as células solares fabricadas com os *wafers* reciclados apresentaram eficiência equivalente à das células virgens (SHIN, PARK, PARK, 2017).

A última etapa de reciclagem da placa solar FV é geralmente o tratamento de águas residuais (SEO, KIM, CHUNG, 2021).

4.2 Resultados de AICV dos módulos FV

As Tabela 12, 13 e 14 mostram os resultados dos indicadores para cada uma das categorias de impacto avaliadas, referentes aos módulos solares 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 12: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 1.

Categorias de Impactos	Unidade	Total	Aço	Alumínio	Vidro	Silício
Mudanças climáticas	Kg CO2 eq	33,1	0,00891	1,75	1,32	24,5
Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq	2,52E-06	4,39E-10	1,28E-07	1,05E-07	1,64E-06
Acidificação terrestre	Kg SO2 eq	0,155	3,36E-05	0,0126	0,0107	0,0892
Eutrofização da água doce	Kg P eq	0,0162	5,68E-06	0,00136	0,000169	0,012
Eutrofização marinha	Kg N eq	0,00813	2,87E-06	0,00078	0,000306	0,00507
Toxicidade humana	Kg 1,4 - DCB	16,6	8,35E-03	2,98	0,238	8,65
Formação fotoquímica de ozônio	Kg NMVOC	0,114	3,70E-05	0,00862	0,00662	0,0653
Formação de partículas finas	Kg PM10 eq	0,00826	3,45E-05	0,00584	3,49E-03	0,0557
Ecotoxicidade terrestre	Kg 1,4 - DB eq	0,00513	1,76E-06	1,37E-03	1,10E-04	0,00213
Ecotoxicidade da água doce	Kg 1,4 - DB eq	1,7	0,00135	0,458	0,0261	0,345
Ecotoxicidade marinha	Kg 1,4 - DB eq	1,51	0,00119	0,405	0,0222	0,312
Radiação ionizante	KBq U235 eq	3,31	0,000468	0,139	0,045	2,64
Ocupação de terras agrícolas	m2a	1,93	0,000278	0,14	0,0617	1,5
Ocupação de terras urbanas	m2a	8,78	3,49E-03	1,1	0,172	3,93
Transformação natural da terra	m2	0,00591	1,05E-06	0,000976	0,000288	0,00318
Consumo de água	m ³	2,08	6,64E-05	0,0533	0,00718	1,99
Escassez de recursos minerais	Kg Fe eq	20,9	0,0125	17,9	0,395	0,543
Escassez de recursos fósseis	Kg oil eq	9	0,00186	0,445	0,325	5,56

Tabela 13: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 2.

Categorias de Impactos	Unidade	Total	Aço	Alumínio	Vidro	Silício
Mudanças climáticas	Kg CO2 eq	17	0,00947	0,677	0,677	12,5
Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq	1,37E-06	4,67E-10	4,96E-08	5,37E-08	8,37E-07
Acidificação terrestre	Kg SO2 eq	0,086	3,57E-05	0,00485	0,00548	0,0455
Eutrofização da água doce	Kg P eq	0,00923	6,03E-06	0,000525	8,62E-05	0,0061
Eutrofização marinha	Kg N eq	0,00425	3,04E-06	0,000301	0,000156	0,00259
Toxicidade humana	Kg 1,4 - DCB	10,7	8,87E-03	1,15	0,121	4,41
Formação fotoquímica de ozônio	Kg NMVOC	0,0611	3,93E-05	0,00333	0,00338	0,0333
Formação de partículas finas	Kg PM10 eq	0,0443	3,67E-05	0,00226	1,78E-03	0,0284
Ecotoxicidade terrestre	Kg 1,4 - DB eq	0,00288	1,87E-06	5,30E-04	5,64E-05	0,00109
Ecotoxicidade da água doce	Kg 1,4 - DB eq	1,4	0,00143	0,177	0,0133	0,176
Ecotoxicidade marinha	Kg 1,4 - DB eq	1,24	0,00127	0,156	0,0114	0,159
Radiação ionizante	KBq U235 eq	1,74	0,000498	0,0536	0,023	1,34
Ocupação de terras agrícolas	m2a	1,02	0,000295	0,0542	0,0316	0,766
Ocupação de terras urbanas	m2a	6,04	3,71E-03	0,427	0,0877	2
Transformação natural da terra	m2	0,00307	1,12E-06	0,000377	0,000147	0,00162
Consumo de água	m ³	1,06	7,05E-05	0,0206	0,00367	1,02
Escassez de recursos minerais	Kg Fe eq	9,33	0,0133	6,92	0,202	0,277
Escassez de recursos fósseis	Kg oil eq	4,7	0,00198	0,172	0,166	3,34

Tabela 14: Avaliação de impactos ambientais potenciais pelo Simapro, Módulo 3.

Categorias de Impactos	Unidade	Total	Aço	Alumínio	Vidro	Silício
Mudanças climáticas	Kg CO2 eq	77,3	0,0573	3,29	3,41	60,6
Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq	5,65E-06	2,82E-09	2,41E-07	2,71E-07	4,06E-06
Acidificação terrestre	Kg SO2 eq	0,331	0,000216	0,236	0,0276	0,221
Eutrofização da água doce	Kg P eq	0,0352	3,65E-05	0,00255	0,000435	0,0296
Eutrofização marinha	Kg N eq	0,0179	1,84E-05	0,00146	0,000788	0,0126
Toxicidade humana	Kg 1,4 - DCB	30,6	5,36E-02	5,59	0,612	21,4
Formação fotoquímica de ozônio	Kg NMVOC	0,25	2,38E-04	0,0116	0,017	0,162
Formação de partículas finas	Kg PM10 eq	0,184	2,22E-04	0,011	8,99E-03	0,138
Ecotoxicidade terrestre	Kg 1,4 - DB eq	0,00999	1,13E-5	2,58E-03	2,84E-04	0,00528
Ecotoxicidade da água doce	Kg 1,4 - DB eq	2,12	0,00865	0,86	0,0672	0,855
Ecotoxicidade marinha	Kg 1,4 - DB eq	1,89	0,00767	0,759	0,0572	0,773
Radiação ionizante	KBq U235 eq	7,69	0,00301	0,261	0,116	6,53
Ocupação de terras agrícolas	m2a	4,45	0,00178	0,263	0,159	3,72
Ocupação de terras urbanas	m2a	14,8	0,0224	2,07	0,442	9,72
Transformação natural da terra	m2	0,013	6,75E-06	0,00183	0,000741	0,00787
Consumo de água	m ³	5,1	0,000427	0,0999	0,0185	4,93
Escassez de recursos minerais	Kg Fe eq	38	0,0803	33,6	1,02	1,34
Escassez de recursos fósseis	Kg oil eq	20,9	0,012	0,835	0,839	16,2

As Figuras 27, 28 e 29 representam as contribuições relativas (%) referentes às categorias de impacto analisadas a partir dos processos que foram analisados desde a extração do silício até a produção e montagem dos módulos solares 1, 2 e 3, respectivamente. Observando-se os valores, é possível perceber que está em linha com literatura científica, uma vez que o silício, o alumínio e o vidro são os materiais que contribuem com a maior participação nos impactos ambientais (OLIVEIRA, 2017; LUNARDI et al., 2018a; LUNARDI et al., 2018b; JIA et al., 2020).

No impacto de mudanças climáticas, os valores de silício representam 74,02%; 73,53% e 78,40%, o alumínio 5,29%; 3,98% e 4,26%, e o vidro 3,99%; 3,98% e 4,41%

dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. O silício apresenta os maiores valores nesta categoria de impacto devido aos processos de purificação, no qual o consumo de energia é intenso e responsável por gerar maiores índices desse impacto (LUNARDI et al., 2018a).

Na depleção da camada de ozônio, os valores de silício representam 65,08%; 61,09% e 71,86%, o alumínio 5,08%; 3,62% e 4,27%, e o vidro 4,17%; 3,92% e 4,80% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3 respectivamente. O principal contribuinte para este impacto, segundo Jia et al. (2020), é a produção do *wafer* de silício. Nesse processo, grandes quantidades de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) são emitidos para a atmosfera. Os óxidos de nitrogênio são estáveis em condições normais na baixa atmosfera, mas na estratosfera são ativados pela radiação ultravioleta e se tornam substâncias que comprometem a camada de ozônio.

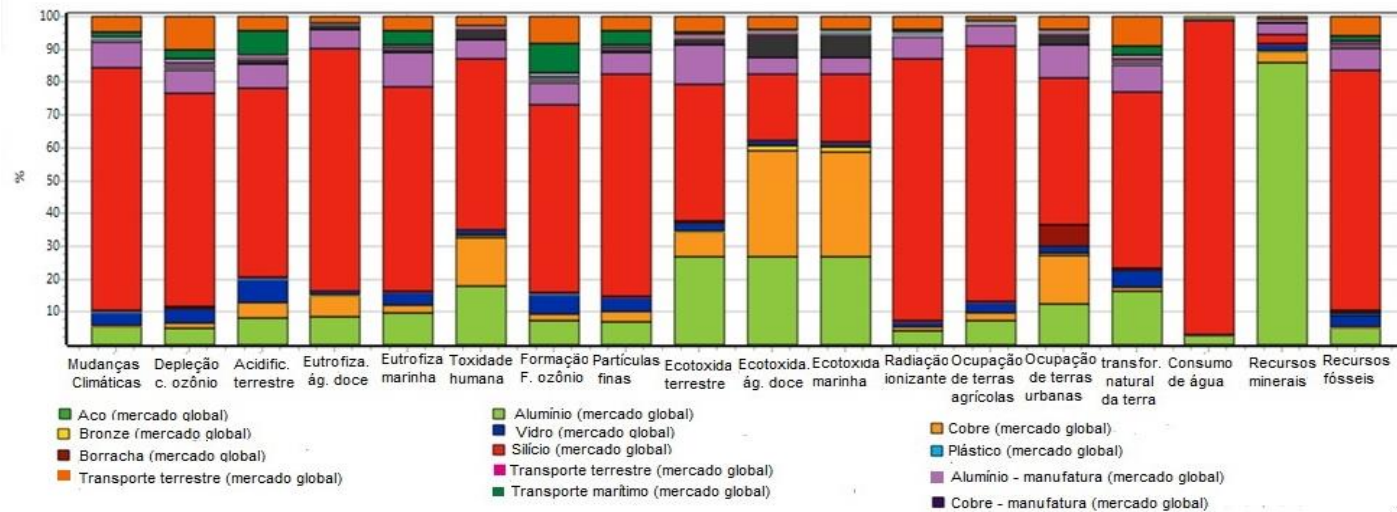


Figura 27: Impactos ambientais relativos avaliados no Módulo 1.

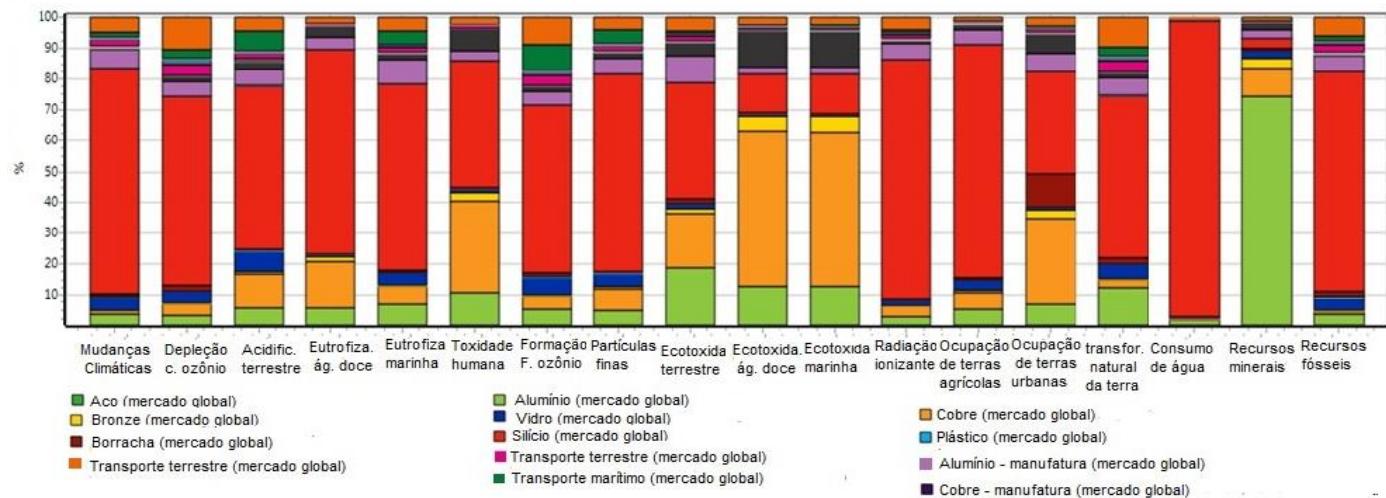


Figura 28: Impactos ambientais relativos avaliados no Módulo 2.

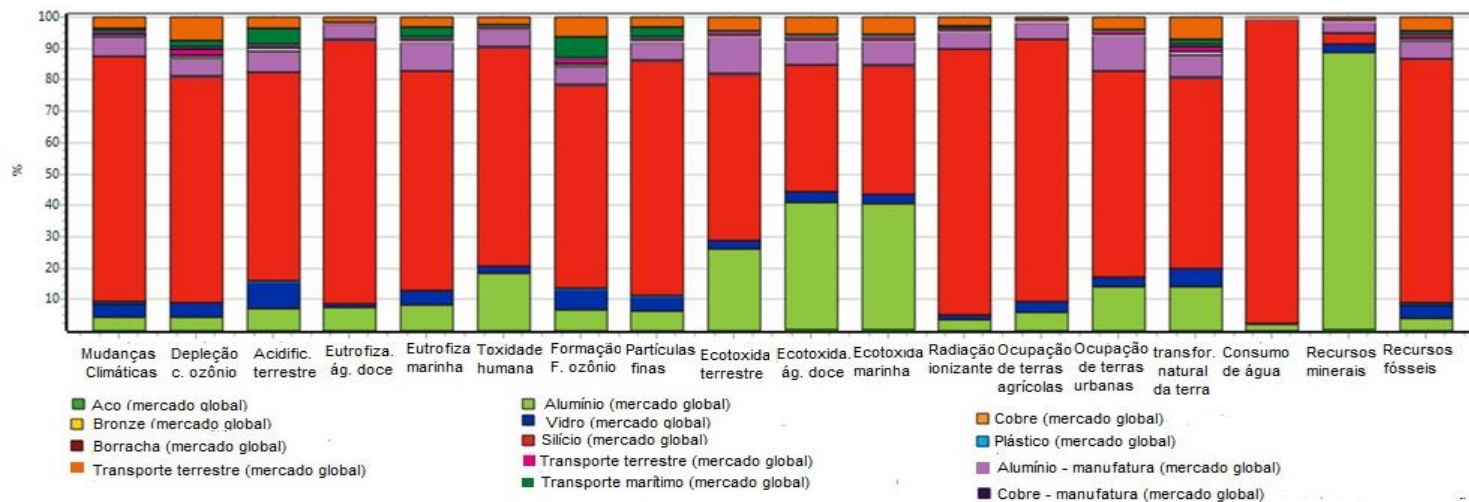


Figura 29: Impactos ambientais relativos avaliados no módulo 3.

Na radiação ionizante, os valores de silício representam 79,76%; 77,01% e 84,92%, o alumínio 4,20%; 3,08% e 3,39%, e o vidro 1,36%; 1,32% e 1,51% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. Bezerra, Lira e Silva (2018) encontraram valor de aproximadamente 90% para a produção de silício do módulo solar FV, quando somados todas as etapas envolvendo a produção e purificação do silício em grau solar.

Na formação fotoquímica de ozônio, os valores de silício representam 57,28%; 54,50% e 64,80%, o alumínio 7,56%; 5,45% e 4,64%, e o vidro 5,81%; 5,53% e 6,80% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. A alta concentração de ozônio é tóxica para o ser humano. O ozônio é produzido pelas complexas reações químicas entre óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos na presença da radiação solar. O dióxido de enxofre é o principal contribuinte para este tipo de impacto, e sua emissão está relacionada com o consumo de energia durante o processo de produção da célula FV, bem como o processo de produção do alumínio (LI et al., 2018; MAANI et al., 2020).

Na formação de partículas finas, os valores de silício representam 67,43%; 64,11% e 75,00%, o alumínio 7,07%; 5,10% e 5,98%, e o vidro 4,23%; 4,02% e 4,89% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. Xie et al. (2018) encontrou valor de 79,48% de representatividade do silício de grau solar nesta categoria de impacto, para um módulo de silício policristalino de 10,21 Kg.

Na acidificação terrestre, os valores de silício representam 57,55%; 52,91% e 66,77%, o alumínio 8,13%; 5,64% e 7,13%, e o vidro 6,90%; 6,37% e 8,34% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. Jia et al. (2020) encontrou valores de 21,82% para produção do wafer e 11,6% para produção de vidro. Andler et al. (2020) encontrou valor de 79% de representatividade do silício de grau solar, 8,5% para o alumínio e 10% para o vidro.

Na eutrofização da água doce, os valores de silício representam 74,07%; 66,09% e 84,09%, o alumínio 8,40%; 5,69% e 7,24%, e o vidro 1,04%; 0,93% e 1,24% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. Andler et al. (2020) encontrou valor de 89% de representatividade do silício de grau solar e 7,4% para o alumínio, e o vidro não obteve representatividade nesta categoria de impacto.

Na eutrofização marinha, os valores de silício representam 62,39%; 60,94%; 70,39%, o alumínio 9,59%; 7,08% e 8,16%, e o vidro 3,76%; 3,67% e 4,40% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. A eutrofização cobre os impactos no ar, na água e no solo causados por elementos que diminuem a biodiversidade, entre os quais nitrogênio e fósforo são os mais relevantes (TELSNIG et al., 2017).

Na ecotoxicidade terrestre, os valores de silício representam 41,52%; 37,85% e 52,85%, o alumínio 26,71%; 18,40% e 25,83%, e o vidro 2,14%; 1,96% e 2,84% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na ecotoxicidade da água doce, os valores de silício representam 20,29%; 12,57% e 40,33%; o alumínio 26,94%; 12,64% e 40,57%, e o vidro 1,54%; 0,95% e 3,17% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na ecotoxicidade marinha, os valores de silício representam 20,66%; 12,82% e 40,90%, o alumínio 26,82%; 12,58% e 40,16%, e o vidro 1,47%; 0,92% e 3,03% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na ecotoxicidade marinha e de água doce, o cobre e o alumínio obtiveram os maiores valores de impactos, estes xenobióticos podem causar aos organismos expostos (peixes e crustáceos) alterações comportamentais, perdas de peso e, em altas concentrações, a morte dos indivíduos (OLIVEIRA et al., 2018). O consumo de energia para a purificação do silício em grau solar também contribui para este tipo de impacto, principalmente com uso de termoelétricas a carvão (LUNARDI et al., 2018b).

Na toxicidade humana, os valores de silício representam 52,11%; 41,21% e 69,93%, o alumínio 17,95%; 10,75% e 18,27%, e o vidro 1,43%; 1,13% e 2,00% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

O que mais contribuiu para este tipo de impacto foi a produção de *wafers*, na qual há a emissão de partículas e flúor para a atmosfera e para a água. O segundo maior tipo de contribuinte foram os metais, como cobre, por exemplo. Em seu processo de preparação, particulados de metais são inevitavelmente lançados na água (Jia et al., 2020).

Na ocupação de terras agrícolas, os valores de silício representam 77,72%; 75,10% e 83,60%, o alumínio 7,25%; 5,31% e 5,91%, e o vidro 3,20%; 3,10% e 3,57% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

No impacto de ocupação de terras urbanas, os valores de silício representam 44,76%; 33,11% e 65,68%, o alumínio 12,53%; 7,07% e 13,99%, e o vidro 1,96%; 1,45% e 2,99% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na escassez de recursos minerais, os valores de silício representam 2,60%; 2,97% e 3,53%, o alumínio 85,65%; 74,17% e 88,42%, e o vidro 1,89%; 2,17% e 2,68% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na escassez de recursos fósseis, os valores de silício representam 61,78%; 71,06% e 77,51%, o alumínio 4,94%; 3,66% e 4,00%, e o vidro 3,61%; 3,53% e 4,01% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente.

O impacto de potencial de escassez de recursos fósseis e minerais, refere-se à redução da disponibilidade de abióticos recursos (não vivos) retirados da terra. Eles são o produto de processos biológicos anteriores (carvão, petróleo e gás) ou processos físicos / químicos (depósitos de minérios metálicos). O uso de metais como cobre nas células e o alumínio na fase de produção do módulo criam maiores impactos em comparação aos outros materiais que constituem o módulo (LUNARDI et al., 2018a).

No impacto de consumo de água, os valores de silício representam 95,67%; 96,23% e 96,67%, o alumínio 2,56%; 1,94% e 1,96%, e o vidro 0,35%; 0,35% e 0,36% dos danos potenciais dos módulos 1, 2 e 3, respectivamente. Nian (2016) encontrou valor de 1,71 m³ de água para produção de módulo solar de 3,34 Kg, no presente trabalho obtivemos valores de 2,08; 1,06 e 5,1 m³, para os módulos de 2,3; 1,1 e 5,4 kg respectivamente.

O transporte marítimo representa 1,39%; 1,31% e 0,90% dos impactos de mudanças climáticas; 2,84%, 2,61% e 1,98%, dos impactos de depleção da camada de ozônio; 9,04%, 8,40% e 6,40% dos impactos da formação fotoquímica de ozônio; 1,09%, 2,38% e 1,76% dos impactos de transformação de uso da terra para os módulos 1, 2 e 3 respectivamente, enquanto o transporte terrestre rodoviário representa 5,64%; 7,92% e 4,59% dos impactos de mudanças climáticas; 12,02%, 20,58% e 9,95%, dos

impactos de depleção da camada de ozônio; 9,86%, 13,26 % e 8,34% dos impactos da formação fotoquímica de ozônio; 10,08%, 14,98% e 9,12% dos impactos de transformação de uso da terra para os módulos 1, 2 e 3 respectivamente. Oliveira (2017) realizou uma modelagem de transporte de módulos solares FV na China e no Brasil, em seu estudo ele conclui que se fossem produzidos os módulos FV no País os impactos ambientais potenciais do transporte seriam quatro vezes menores.

4.3 Compensação de Carbono

Alguns mecanismos de compensação de carbono vêm se desenvolvendo e sendo implementados nos últimos anos. O sistema de comércio de créditos de carbono é considerado uma das estruturas mais eficazes para permitir uma redução economicamente sustentável das emissões de GEE, particularmente dióxido de carbono, na atmosfera (AHMADI, KANNANGARA, BENSEBAA, 2020).

Para projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma tonelada de CO₂ equivalente corresponde a uma redução certificada de emissão (CER), a qual pode ser vendida como crédito para emissão de 1 tonelada de CO₂ na atmosfera (MOREIRA et al., 2020).

Como definido na etapa 3.3 da AICV, o fluxo de referência corresponde a produção de um módulo FV de cada modelo apresentado. A Tabela 15 apresenta as emissões de CO₂-eq unitária e para a produção total de 7 mil módulos FV de cada modelo, bem como a precificação do crédito de carbono em reais (R\$). A precificação do carbono foi baseada em três valores potenciais, de acordo com Samsher (2020): R\$50/tCO₂, R\$90/tCO₂ e R\$115/tCO₂.

Tabela 15: Emissões de CO₂-eq para produção unitária e produção anual, e precificação de créditos de carbono em reais (R\$), para os módulos 1, 2 e 3.

Descrição	Emissões CO ₂ -eq/Unidade (Kg CO ₂ -eq)		Precificação R\$/tonelada CO ₂ -eq		
	1 unidade	7 mil unidades	50 R\$	90 R\$	115 R\$
Módulo 1	32,9	230.300	11.515,00	20.727,00	26.484,50
Módulo 2	16,7	116.900	5.845,00	10.521,00	13.443,50
Módulo 3	76,7	536.900	26.845,00	48.321,00	61.743,50
Total	126,3	884.100	44.205,00	79.569,00	101.671,50

Para realizar a compensação ambiental em créditos de carbono anual para o módulo 1, é necessário desembolsar um valor variando de 12 mil a 26 mil reais aproximadamente; para o módulo 2, um valor variando de 6 mil a 13 mil reais aproximadamente; e para o módulo 3, um valor variando de 27 mil a 62 mil reais aproximadamente.

O preço de uma placa solar é em média R\$ 2,65/watts (PORTAL SOLAR, 2021), sendo assim os módulos FV utilizados custam R\$ 53, R\$ 26,5 e R\$ 132,5 / unidade para os módulos 1, 2 e 3 respectivamente. Para 7 mil unidades de cada modelo os valores são R\$ 371 mil, R\$ 185,5 mil e R\$ 927,5 mil para os módulos 1, 2 e 3 respectivamente, sendo assim a compensação por crédito de carbono corresponderia a um valor entre de 3% a 7% do valor do módulo FV.

4.4 Proposição de um *framework* para aplicação da ACV em módulos solares FV

Com os resultados obtidos e a partir dos modelos conceituais de Wang et al. (2020) e Alves (2015), foi possível elaborar o fluxograma apresentado na Figura 30, que representa um *framework* proposto para a aplicação da ACV em módulos solares FV de silício cristalino de 1^a geração.

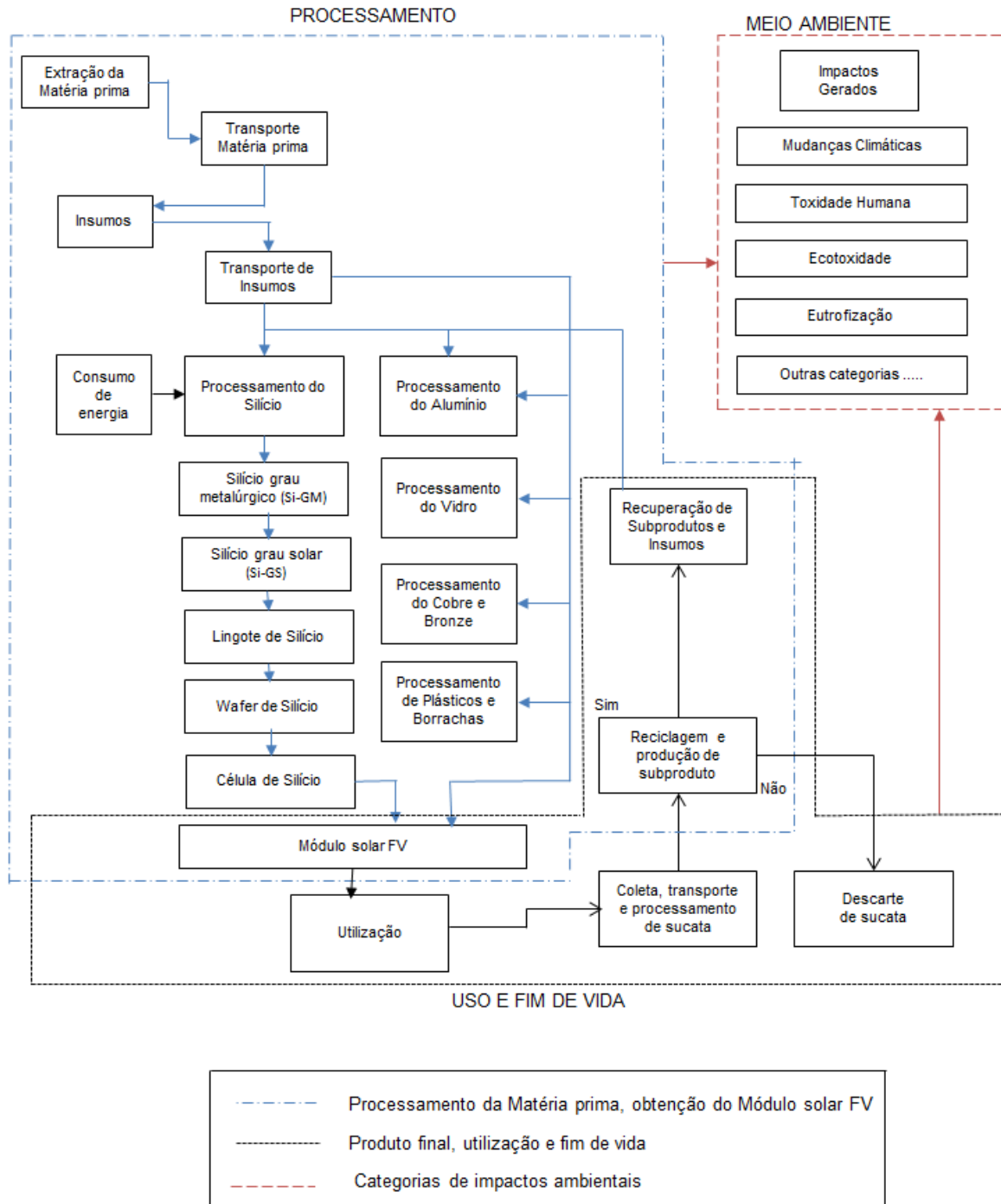


Figura 30: Preposição de um framework para a aplicação da ACV em módulo FV.

A estrutura do *framework* foi dividida em três grandes etapas diferenciadas por cores e linhas, o processamento da matéria prima (definida pela “linha tracejada e ponto” na cor azul) representa as principais etapas do fluxo de materiais partindo da sua extração,

transporte e produção (e.g., alumínio, vidro, silício grau solar), é importante ressaltar que em cada etapa do processo produtivo existe o consumo de energia de diferentes fontes (e.g., elétrica, térmica). As setas em azul indicam os fluxos de materiais, sendo possível observar que a recuperação do módulo solar FV entra nessa fase de processamento.

A partir do processamento foi elaborada a etapa de produto final, utilização e fim de vida (definida por “linha ponto” na cor preta), esta etapa engloba o transporte, utilização, coleta e o descarte final do módulo solar FV. As setas na cor preta apresentam o fluxo desta etapa, a reciclagem de materiais do módulo FV segue em uma via de mão dupla, uma vez que o painel solar FV possui alguns componentes onde não é possível reciclagem e reutilização.

Por fim, a partir das duas etapas anteriores são gerados diversos impactos ambientais potenciais (definidos pela “linha tracejada” na cor vermelha). As setas em vermelho indicam essa geração de impactos ambientais potenciais provenientes da etapa de processamento bem como da etapa de utilização e fim de vida do módulo FV.

O *framework* apresenta de forma simplificada toda a cadeia produtiva de um painel solar FV, partindo da extração de matéria prima, processamento, produção do painel solar FV, utilização e descarte final.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou de analisar os impactos ambientais potenciais associados aos componentes usados para a produção de módulos solares FV de silício cristalino de 1ª geração, com o intuito de identificar aqueles com maior carga ambiental. Nesse sentido, identificou-se que os componentes a base de silício grau solar (célula fotovoltaica), de vidro (vidro de proteção) e de alumínio (esquadrias de alumínio usadas no encapsulamento dos módulos) foram responsáveis por grande parte dos impactos identificados para a maioria das categorias avaliadas.

Foi realizado uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para os principais impactos gerados ao longo da cadeia de processos, desde a extração dos materiais, tais como: o silício, o alumínio e o vidro, passando pela etapa de processamento, transporte, produção e montagem do módulo FV até a disponibilização do módulo solar para a venda, em uma perspectiva do berço-ao-portão (*cradle-to-gate*).

Por meio da desmontagem dos módulos em um laboratório, foi possível realizar a identificação dos materiais que constituem o módulo FV, bem como a quantificação de massa desses materiais, sendo estes valores utilizados para a modelagem computacional no software SimaPro. A partir do modelo computacional, foi realizada a quantificação dos impactos ambientais do módulo solar de silício de 1ª geração, em toda sua cadeia de produção da extração a fabricação e montagem do equipamento. Verificou-se também, a maior parte dos componentes constituintes do módulo solar são possíveis de serem reciclados e reutilizados, fato confirmado pela literatura.

O silício (célula fotovoltaica) teve o maior impacto ambiental potencial em 15 das 18 categorias analisadas, o alumínio (esquadrias de alumínio) obteve maior representatividade na categoria de escassez de recursos minerais e ecotoxicidade da água doce e marinha, o vidro teve baixa representatividade quando comparado com o silício e o alumínio, porém seu maior impacto ambiental potencial foi na categoria de acidificação terrestre.

A compensação ambiental por crédito de carbono é uma opção possível e viável, sendo necessário desembolsar um montante variando de 44 mil a 101 mil reais aproximadamente para uma produção anual de 21 mil módulos FV.

A partir das ações realizadas e dos resultados obtidos, foi possível elaborar um *framework* para a aplicação da avaliação do ciclo de vida para módulos solares FV de silício cristalino de 1ª geração.

No Brasil a utilização da energia solar FV é viável em praticamente todo o território, sendo esta uma importante fonte de diversificação do mix da matriz energética do País, atualmente muito depende da energia hidroelétrica e de combustíveis fósseis.

Vale ressaltar a importância da prática da reciclagem e da economia circular para os componentes do módulo FV, além de trazer sustentabilidade ambiental esta prática contribui para redução da destinação em aterros, bem como redução de extração de matérias primas.

Por fim, a ampliação da utilização da energia solar FV no Brasil dependerá de políticas governamentais e socioeconômicas.

5.1 Propostas para Pesquisas Futuras

Serão apresentadas a seguir algumas propostas de estudos relativos ao tema que complementam o que foi estudado neste projeto de pesquisa:

- Estudo sobre a Avaliação do Ciclo de Vida em todo o processo produtivo “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), do módulo solar FV de silício cristalino de 1ª geração.
- Aplicação do *framework* proposto para aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em outros módulos FV de silício cristalino de 1ª geração.
- Expansão do *framework* proposto de modo que ele possa ser utilizado também para estudos de Avaliação do Ciclo de Vida para módulos solares FV de 2ª geração.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR, 14, 2019. Disponível em:< <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>> Acesso em: 10 fev. 2021.
- ABDOLI, S.; PAMULAPATI, M.; KARA, S. An investigation into the role of PV industry in meeting the growing energy demand towards absolute sustainability. **Procedia CIRP**, 90, 383-387, 2020.
- ACERO, A. P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. **LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories**. 2015. Disponível em:< <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCA-METHODS-v.1.5.2.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2021.
- AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. Cost-effectiveness of small-scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 37, 100627, 2020.
- ALDY, J. E.; STAVINS, R.N. The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Experience. **Journal of Environment & Development**, 21, 2, 152–180, 2012.
- ALVES, A. R. **Proposição de um modelo para a avaliação do ciclo de vida do nióbio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – UNIMEP – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Barbara d’ Oeste, 2015.
- ALVES, I. M. **Avaliação energética e ambiental do ciclo de vida de um sistema de abastecimento de água**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.
- AMAN, M. M.; SOLANG, K. H.; HOSSAIN, M. S.; BADARUDIN, A.; JASMON, G. B.; MOKHLIS, H.; BAKAR, A. H. A.; KAZI, S. N. **A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1190–1204, 2015.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Relatório da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica**. 2019. Disponível em:< <https://www.ana.gov.br/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguas-do-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica> > Acesso em: 06 nov. 2019.
- ANDLER, J.; MATHUR, N.; SUTHERLAND, J.; ZHAO, F.; HANDWERKER, C. Guiding the environmental design of a novel solar absorber through life cycle assessment by identifying anticipated hot spots. **Journal of Cleaner Production**, 258, 120847, 2020.

- ARDENTE, F.; LATUNUSSA, C. E. L.; BLENGINI, G. A. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. **Waste Management**, 91, 156-167, 2019.
- ASHRAFUZZAMAN, M.; FURINI, G. L. Climate change and human health linkages in the context of globalization: An overview from global to southwestern coastal region of Bangladesh. **Environment International**, 127, 402 – 411, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009a). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009b). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009.
- ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. **Banco de dados solarimétricos**. Coordenador Chiguera Tiba et al., Ed. Universitária da UFPE, Recife, 2000. Disponível em:< https://www.academia.edu/35521020/Atlas_Solarim%C3%A9trico_do_Brasil_Banco_de_Dados_Terrestres> Acesso em: 15 mar. 2021.
- BAFFARI, D.; REYNOLDS, A. P.; MASNATA, A.; FRATINI, L.; INGARAO, G. Friction stir extrusion to recycle aluminum alloys scraps: Energy efficiency characterization. **Journal of Manufacturing Processes**, 43, 63-69, 2019.
- BARRETO, L. V.; BARROS, F. M.; BONOMO, P.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. S. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, 9, 16, 2165 – 2179, 2013.
- BEZERRA, J. L.; LIRA, M. A. T.; SILVA, E. A. **Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.
- BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Runaway 53GW Solar Boom in China Pushed Global Clean Energy Investment Ahead in 2017**. Disponível em:< <https://about.bnef.com/blog/runaway-53gw-solar-boom-in-china-pushed-global-clean-energy-investment-ahead-in-2017/>> Acesso em: 10 de mar. 2020.
- BHANDARI, K. P.; COLLIER, J. M.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. S. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 47, 133–141, 2015.
- BLANCO, C. F.; CUCURACHI, S.; GUINEE, J. B.; VIJVER, M. G.; PEIJNENBURG, W. J. G. M.; TRATTNIG, R.; HEIJUNGS, R. Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics. **Journal of Cleaner Production**, 259, 120968, 2020.

- BRANCO, D. A. C. **Avaliação do real potencial de redução das emissões de CO₂ equivalente com uso da captura em uma ute a carvão.** Tese de doutorado em Planejamento Energético – UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- BROUGH, D.; JOUHARA, H. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. **International Journal of Thermofluids**, 1-2, 100007, 2020.
- BROWN, G.F.; WU, J. Third generation photovoltaics. **Laser & Photonics Reviews**, 3, 4, 394-405, 2009.
- BYE, G.; CECCAROLI, B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 130, 634-646, 2014.
- CAMARATTA, R.; VOLKMER, T. M.; OSORIO, A. G. Embodied energy in beverage packaging. **Journal of Environmental Management**, 260, 110172, 2020.
- CARNEIRO, J. **Electromagnetismo B módulos fotovoltaicos**: Características e associações. Universidade do Minho, 18p, 2010. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf> Acesso em: 12 mar. 2021.
- CARVALHO, A. L. C. **Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ROCIO, M. A. R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?. **BNDS setorial**, 40, 205-234, 2014.
- CLEAN ENERGY REVIEWS. **Solar fotovoltaico.** 2018. Disponível em <<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>>, Acesso em 14 de Jan 2019.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. **Série tecnologia ambiental**: Metalurgia do silício: Processos de obtenção e impactos ambientais. 41, 42p, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/328/1/sta-41.pdf>> Acesso em: 22 de fev. 2021.
- CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudo Prospectivo em Energia Fotovoltaica**: Produção de silício grau solar no Brasil. Nota técnica. Brasília, 2009. Disponível em: <https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Produ%C3%A7%C3%A3o+de+sil%C3%ADcio+grau+solar+no+Brasil_Nota+T%C3%A9cnica+CGEE_13_5304.pdf/838757da-f731-4520-8f0d-5016fad66f19?version=1.0> Acesso em: 14 de mar. 2021.

- CHEN, W.; HONG, J.; YUAN, X.; LIU, J. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. **Journal of Cleaner Production**, 112, 1025 – 1032, 2016.
- CHEN, H.; MORITA, K.; MA, X.; CHEN, Z.; WANG, Y. Boron removal for solar-grade silicon production by metallurgical route: A review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 203, 110169, 2019.
- CHOU, S. -Y.; TUYET, N. T. A.; YU, T. H. -K.; PHUC, P. N. K. Financial assessment of government subsidy policy on photovoltaic systems for industrial users: A case study in Taiwan. **Energy Policy**, 87, 505 – 516, 2015.
- CHOWDHURY, M. S.; RAHMAN, K. S.; CHOWDHURY, T.; NUTHAMMACHOT, N.; TECHATO, K.; AKHTARUZZAMAN, M.; TIONG, S. K.; SOPIAN, K.; AMIN, N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, 27, 100431, 2020.
- COXON, P. R.; COTO, M.; JUZELIUNAS, E.; FRAY, D. The use of electro-deoxidation in molten salts to reduce the energy consumption of solar grade silicon and increase the output of PV solar cells. **Progress in Natural Science Materials International**, 25, 583-590, 2015.
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ed. Especial, 2004. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf> Acesso em: 05 mar. 2021.
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: 21 fev. 2021.
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Energia solar princípios e aplicações**. 2019. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf> Acesso em: 12 nov. 2019.
- CRESWELL, J.W. **Research design – qualitative, quantitative and mixed methods approaches**. 3. ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2009.
- DESIDERI, U.; ZEPPARELLI, F.; MORETTINI, V.; GARRONI, E. Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: Technical and environmental evaluations. **Applied Energy**, 102, 765–784, 2013.

- DIAS, C. L. A.; BRANCO, D. A. C.; AROUCA, M. C.; LOUREIRO, L. F. L. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, 114, 367 – 75, 2017.
- DIAS, P.; SCHMIDT, L.; LUNARD, M. M.; CHANG, N. L.; SPIER, G.; CORKISH, R.; VEIT, H. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation & Recycling**, 165, 105241, 2021.
- DJØRUP, S.; THELLUFSEN, J. Z.; SORKNÆS, P. The electricity market in a renewable energy system. **Energy**, 162, 148 - 157, 2018.
- ECHEGARAY, F. Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Clean Production**, 63, 125 – 33, 2014.
- ELY, F.; SWART, J.W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração**. 2014. Disponível em:< <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>> Acesso em: 28 de mar. 2020.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2018**: Relatório síntese/ ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em:< https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf> Acesso em: 15 mar. 2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2019**: Relatório síntese/ ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>> Acesso em: 16 mar. 2021.
- ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do BNDES**, 40, 2013.
- FALCÃO, V. D. **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais – IME – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
- FAHEY D. W. **Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer**. World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project – Report, 47, 2002. Disponível em:<

https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=5232#.YFCr1FVKjcc> Acesso em: 16 mar. 2021.

- FRAAS, L. M. **History of Solar Cell Development: Low-Cost Solar Electric Power**. Ed. Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- FENG, K.; HUBACEK, K.; SIU, Y. L.; LI, X. The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 39, 342–355, 2014.
- FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R. Sunshine, global radiation and net radiation in Brazil. **Revista do Instituto Geológico**, 38, 2, 49-83, 2017.
- GOEDKOOP, M; HEIJUNGS, R; HUIJBREGTS, M; SCHRYVER, A; STRUIJS, J; ZELM, R. Recipe 2008: **A lifecycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Report I: characterization. National Institute of Public Health, Netherlands, 1, 2009.
- GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Ed. Springer, 2005.
- GONG, J.; DARLING, S. B.; YOU, F. Perovskite photovoltaics: life-cycle assessment of energy and environmental impacts. **Energy & Environmental Science**, 8, 1953 - 1968, 2015.
- GOOGLE MAPS. **Rotas**. 2021. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/dir/>>. Acessado em 30 de maio de 2021.
- GUO, F.; LI, N.; FECHER, F.W.; GASPARINI, N.; QUIROZ, C.O.R.; BRONNBAUER, C.; HOU, Y.; RADMILOVIĆ, V.V.; RADMILOVIĆ, V.R.; SPIECKER, E.; FORBERICH, K.; BRABEC, C.J. A generic concept to overcome bandgap limitations for designing highly efficient multi-junction photovoltaic cells. **Nature Communications**, 6, 7730, 2015.
- HAUSCHILD, M. Z.; HUIJBREGTS, M. A. J. **Introducing life cycle impact assessment. Chapter 1. In Life cycle impact assessment**. Org. Hauschild and Huijbregt, ed. Springer, 2015.
- HINZ, R. T. P.; VALENTINA, L. V. D.; FRANCO, A. C. Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela avaliação do ciclo de vida. **Estudos tecnológicos**, 2, 2, 91-98, 2006.
- HOANG, S. **The Environmental History of Solar Photovoltaic Cells**. Wellesley College Digital Scholarship and Archive, 2017. Disponível em:<<https://repository.wellesley.edu/object/ir1017>> Acesso em: 02 jan. 2021.

- HOU, G.; SUN, H.; JIANG, Z.; PAN, Z.; WANG, Y.; ZHANG, X.; ZHAO, Y.; YAO, Q. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, 164, 882 – 890, 2016.
- HUANG, B., ZHAO, J., CHAI, J., XUE, B., ZHAO, F., WANG, X. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. **Solar Energy**, 143, 132–141, 2017.
- IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia e CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Desenvolvimento sustentável e avaliação do ciclo de vida. Brasília**. 2014. Disponível em:<<https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/03/CartilhaDesenvolvimentoSustentavel.pdf>> acesso em: 06 mar. 2021.
- IDEAL - Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica**. 2018. Disponível em <https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudofv2018_digital3>. Acesso em: 01maio. 2021.
- IEA- International Energy Agency. **Photovoltaic Power Systems Programme: Snapshot of Global Photovoltaic Markets (2018)**. 2018. Disponível em: <www.iea-FVps.org> Acesso em: 12 fev. 2019.
- IEA - International Energy Agency. **Solar energy**. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>> Acesso em: 16 jul. 2019a.
- IEA - International Energy Agency. **Emissions**. Disponível em:<<https://www.iea.org/geco/emissions/>> Acesso em: 03 dez. 2019b.
- IEA – International Energy Agency. **Shaping a secure and sustainable energy future for all**. Disponível em:<<https://www.iea.org/>> Acesso em: 10 fev. 2020a.
- IEA - International Energy Agency. **World Energy Balances: Overview**. 2020. Disponível em:<<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>> Acesso em: 05 de mar. 2020b.
- IEEFA - International Energy Economics and Financial Analysis. **China's global renewable energy expansion**. 2017. Disponível em:<https://ieefa.org/wp-content/uploads/2017/01/Chinas-Global-Renewable-Energy-Expansion_January-2017.pdf> Acesso em: 17 Mar. 2020.

- IFC – International Finance Corporation. **Utility-scale solar photovoltaic power plants: A project developer’s guide.** Washington, 2015. Disponível em:< https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_utility-scale+solar+photovoltaic+power+plants> Acesso em: 07 mar. 2021.
- INPE – Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2017. Disponível em:< <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>> Acesso em: 07 mar. 2020.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change.** 2015. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/search/?search=Climate+change> > Acesso em: 04 maio 2020.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil.** 2016. Disponível em:< http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf > Acesso em: 09 mar. 2021.
- IRENA - International Renewable Energy Agency. **Solar FV Waste Offers Significant Business Opportunity.** 2016. Disponível em:<<https://www.irena.org/newsroom/articles/2016/Jun/Solar-FV-Waste-Offers-Significant-Business-Opportunity>> Acesso em: 16 Mar. 2020.
- JACOBSEN, A. L.; CONTO, S. F.; SILVÉRIO, R. C.; GUIMARÃES, V. R.; SILVA, W. C. **Perfil metodológico de pesquisas elaboradas no âmbito das instituições de ensino superior brasileiras: uma análise de publicações feitas pela revista ciências da administração.** XVII Colóquio Internacional de Gestão Universitária, Mar del Prata, 2017.
- JÄGER, K.; ISABELLA, O.; SMETS, A. H. M.; SWAAIJ, R. A. C. M. M.; ZEMAN, M. **Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems.** (ed.) Delft University of Technology, 2014.
- JIA, X.; LV, F.; LI, P.; WANG, W. Life-cycle assessment of p-type multi-Si back surface field (BSF) solar module in China of 2019. **Solar Energy**, 196, 207 – 216, 2020.
- KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: Processes and systems.** Ed. Elsevier Inc. 2009.
- KAISER, M.; BERNAUER, M.; SUNSTEIN, C. R.; REISCH, L. A. The power of green defaults: the impact of regional variation of opt-out tariffs on green energy demand in Germany. **Ecological Economics**, 174, 106685, 2020.
- KHADIR, A. Thin film solar cell efficiency enhancement using a gradient doping absorbent layer. **Optical Materials**, 108, 110443, 2020.

- KUMAR, R. **Research methodology – a step-by-step guide for beginners**. 3. ed. London: Sage, 2011.
- LACROIX, M.A.D. **Uso de células fotovoltaicas de filmes finos para geração de energia elétrica em edifícios urbanos: Estimativa de potencial**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2013.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, elaboração, análise e interpretação dos dados**. 5. Ed., São Paulo, Atlas, 2002.
- LAURENT, A. –B.; MENARD, J. –F.; LESAGE, P.; BEAUREGARD, R. Cradle-to-Gate Environmental Life Cycle Assessment of the Portfolio of an Innovative Forest Products Manufacturing Unit. **BioResources**, 11, 4, 8981 – 9001, 2016.
- LAUSSELET, C.; LUND, K. M.; BRATTEBØ, H. LCA and scenario analysis of a Norwegian net-zero GHG emission neighborhood: The importance of mobility and surplus energy from PV technologies. **Building and Environment**, 189, 107528, 2020.
- LATUNUSSA, C. E. L.; ARDENTE, F.; BLENGINI, G. A.; MANCINI, L. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 156, 101–111, 2016.
- LEANDRO, F. S. **Análise do ciclo de vida de quatro diferentes tecnologias de aproveitamento de energia solar para produção de energia elétrica para poços de Caldas-MG**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.
- LI, G.; XUAN, Q.; PEI, G.; SU, Y.; LU, Y.; JI, J. Life-cycle assessment of a low-concentration PV module for building south wall integration in China. **Applied Energy**, 2015, 174 – 185, 2018.
- LIRA, M. A. T.; MELO, M. L. S.; RODRIGUES, L. M.; SOUZA, T. R. M. Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 34, 3, 389 - 397, 2019.
- LUNARDI, M. M.; ALVAREZ-GAITAN, J. P.; CHANG, N. L.; CORKISH, R. Life cycle assessment on PERC solar modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 187, 154 – 159, 2018a.
- LUNARDI, M. M.; MOORE, S.; ALVAREZ-GAITAN, J. P.; CHANG, Y.; HAO, X.; CORKISH, R. A comparative life cycle assessment of chalcogenide/Si tandem solar modules. **Energy**, 145, 700 – 709, 2018b.

- MA, T.; LI, Z.; ZHAO, J. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (FV-PCM): technology overview and materials selection. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 116, 1 - 16, 2019.
- MAANI, T.; CELIK, I.; HEBEN, M. J.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **Science of the Total Environment**, 735, 138827, 2020.
- MARAZZITI, D.; CIANCONI, P.; MUCCI, F.; FORESI, L.; CHIARANTINI, I.; VECCHIA, A. D. Climate change, environment pollution, COVID-19 pandemic and mental health. **Science of the Total Environment**, 773, 145182, 2021.
- MELO, L. B.; ESTANISLAU, F. B. G. L.; COSTA, A. L.; FORTINI, A. Impacts of the hydrological potential change on the energy matrix of the Brazilian State of Minas Gerais: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 110, 415-422, 2019.
- MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/acessibilidade/item/641-cap%C3%ADtulo-9.html>> Acesso em: 11 mar. 2021.
- MME – Ministério de Minas e Energia. **Sistemas Híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. 1º Ed, Brasília, 2008. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf> Acesso em: 16 mar. 2021.
- MESQUITA, D.B.; SILVA, J.L.S.; MOREIRA, H.S.; KITAYAMA, M.; VILLALVA, M.G. **A review and analysis of technologies applied in FV modules**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America, 2019.
- MONARO, D.L.G. **Avaliação do ciclo de vida da indústria de eletroeletrônicos portáteis: um estudo de caso do fim de vida do microcomputador**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – UNIMEP – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Barbara d’ Oeste, 2014.
- MOREIRA, S. L. L.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT. C.; DIETRICH, O. H. S.; PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, 265, 121628, 2020.

- NAVAL RESEARCH LABORATORY. **New multi-junction solar cell could break efficiency barrier**. 2013. Disponível em: < <https://phys.org/news/2013-01-multi-junction-solar-cell-efficiency-barrier.html> > Acesso em: 28 mar. 2020.
- NIAN, V. Impacts of changing design considerations on the life cycle carbon emissions of solar photovoltaic systems. **Applied Energy**, 183, 1471 – 1487, 2016.
- OKUNO, M. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, 27, 77, 2013.
- OLIVEIRA, A.S. **Avaliação de impactos ambientais do módulo fotovoltaico: Produção e uso como fonte de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- OLIVEIRA, M. M. D.; MENDES, M.; HANSEL, C. M.; DAMIANI, S. **Cidadania, meio ambiente e sustentabilidade**. 1 Ed. Caxias do Sul, RS: Educs - Editora da Universidade de Caxias do Sul, 2017.
- OLIVEIRA, S. C.; WAGNER, C.; HERMAN, E. C.; ROSA, R. B.; PERTILLE, D. C.; VIVIAN, F. T. Avaliação toxicológica dos efeitos do cobre na espécie *Carassius auratus*. **Revista gestão & sustentabilidade ambiental**, 7, 2, 260 - 275, 2018.
- ORIMOLOYE, I. R.; MAZINYO, S. P.; KALUMBA, A. M.; EKUNDAYO, O. Y.; NEL, W. Implications of climate variability and change on urban and human health: A review. **Cities**, 91, 213 – 223, 2019.
- PAIM, M. –A.; DALMARCO, A. R.; YANG, C. –H.; SALAS, P.; LINDNER, S.; MERCURE, J. –F.; GUERRA, J. B. S. O. A.; DERANI, C.; SILVA, T. B.; VIÑUALES, J. E. Evaluating regulatory strategies for mitigating hydrological risk in Brazil through diversification of its electricity mix. **Energy Policy**, 128, 393 – 401, 2019.
- PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 1625 – 1636, 2011.
- PAVLOVIC, T.; MILOSAVLJEVIC, D.; RADONJIC, I.; PANTIC, L.; RADIVOJEVIC, A.; PAVLOVIC, M. Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 20, 201 - 218, 2013.
- PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 19, 255–274, 2013.
- PINTO, M. A.; FRATE, C. A.; RODRIGUES, T. O.; CALDEIRA-PIRES, A. Sensitivity analysis of the carbon payback time for a Brazilian photovoltaic power plant. **Utilities Policy**, 63, 101014, 2020.

- PORTAL SOLAR. **Tipos de Paine Solar Fotovoltaico**. 2020. Disponível em:< <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em: 27 mar. 2020.
- PORTAL SOLAR. **Placa Solar Preço**. 2021. Disponível em:< <https://www.portalsolar.com.br/placa-solar-preco.html#:~:text=Placa%20Solar%20Pre%C3%A7o,%24%20%2C80%20por%20Watt.>> Acesso em: 10 maio. 2021.
- RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; SAYED, E. T.; ELSAID, K.; CHAE, K. -J.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. G. Environmental impacts of solar energy systems: A review. **Science of the Total Environment**, 754, 141989, 2021.
- RAMOS, L. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Geração de Eletricidade Abordando o Ciclo de Vida: Uma Revisão Sistemática sob a Ótica da Sustentabilidade Ambiental. **E&S - Engineering and Science**, 1 (6), 14-28, 2017.
- REN, X.; BARRERA, C. S.; TARDIFF, J. L.; GIL, A.; CORNISH, K. Liquid guayule natural rubber, a renewable and crosslinkable processing aid in natural and synthetic rubber compounds. **Journal of Cleaner Production**, 276, 122933, 2020.
- REPN - Renewable Energy Policy Network. **Renewables 2020 global status report**. 2020. Disponível em:< https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf > Acesso em: 07 mar. 2020.
- ROGELJ, J.; POPP, A.; CALVIN, K. V.; LUDERER, G.; EMMERLING, J.; GERNAAT, D.; FUJIMORI, S.; STREFLER, J.; HASEGAWA, T.; MARANGONI, G.; KREY, V.; KRIEGLER, E.; RIAHI, K.; VUUREN, D. P. V.; DOELMAN, J.; DROUET, L.; EDMONDS, J.; FRICKO, O.; HARMSSEN, M.; HAVLÍK, P.; HUMPENÖDER, F.; STEHFEST, E.; TAVONI, M. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. **Nature Climate Change**, 8, 2, 325 - 332, 2018.
- ROMERA, K. S.; DUARTE, L. G.; BRUNELLI, T. C.; PALÁCIOS, R. S.; CURADO, L. F. A.; NOGUEIRA, J. S. **Quantificação do Ozônio Troposférico e suas relações com variáveis micrometeorológicas no Pantanal Mato-Grossense**. 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Jardim, outubro de 2018.
- ROSELI, C.; DIGLIO, G.; SASSO, M.; TARIELLO, F. A novel energy index to assess the impact of a solar PV-based ground source heat pump on the power grid. **Renewable Energy**, 143, 488-500, 2019.
- ROSSI, F.; HELENO, M.; BASOSI, R.; SINICROPI, A. Environmental and economic optima of solar home systems design: A combined LCA and LCC approach. **Science of the Total Environment**, 744, 140569, 2020.

- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Ed. LABSOLAR, Florianópolis, 114p, 2004.
- SÁNCHEZ, E.; TORREBLANCA, J.; CARBALLO, T.; PARRA, V.; BULLÓN, J.; MÍGUEZ, J. M.; GUTIÉRREZ, J.; GARCÍA, J.; GUERRERO, I.; ORDÁS, R.; IZARD, J. Outdoor monitoring of the energy yield and electrical parameters of standard polysilicon based and new umg-Si PV modules. **Energy Procedia**, 8, 503–508, 2011.
- SANTOS, J. A.; JONG, P.; COSTA, C. A.; TORRES, E. A. Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. **Utilities Policy**, 67, 101084, 2020.
- SAMSHER, D. Comparative analysis of energy matrices and enviro-economics for active and passive solar still. **Materials Today: Proceedings**, pre-proofs, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320375611>> Acesso em: 9 maio. 2021.
- SEARATES. **Distance & Time**. 2021. Disponível em: <<https://www.searates.com/services/distances-time/>> Acessado em 23 de maio de 2021.
- SEO, B.; KIM, J. Y.; CHUNG, J. Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts. **Waste Management**, 128, 45-54, 2021.
- SHIN, J.; PARK, J.; PARK, N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 162, 1-6, 2017.
- SILVEIRA, E. **Filmes captam a energia do Sol**. 2016. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2016/09/23/filmes-captam-a-energia-do-sol/>> Acesso em: 28 mar. 2020.
- SIMON, M.; MASSEREY, B.; ROBYR, J-L.; FROMME, P. **High frequency guided wave defect imaging in monocrystalline silicon wafers**. Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII, 1097206, 2019.

- SMITH, W. "**Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current**", Nature, 20 February 1873, p.303. Disponível em: <<https://digicoll.library.wisc.edu/cgi-bin/HistSciTech/HistSciTech-idx?type=article&did=HistSciTech.Nature18730220.Smith01&id=HistSciTech.Nature18730220&isize=M>> Acesso em: 02 mar. 2021.
- SOUZA, M. A.; FARIAS, F. S.; COSTA, J. C. W. A.; CARDOSO, D. L. Technical Economic Analysis of Photovoltaic systems in heterogeneous mobile networks. **Procedia Computer Science**, 109, 825 – 832, 2017.
- SPANGGAARD, H.; KREBS, F. C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 83, 125 – 146, 2004.
- SPE – Solar Power Europe. **Global Market Outlook for Solar Power / 2018 – 2022**. Disponível em: <<https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf>> Acesso em: 18 mar. 2020.
- TAWFIK, M. M.; NEMAT-ALLA, M. M.; DEWIDAR, M. M. Enhancing the Properties of Aluminum Alloys Fabricated Using Wire + Arc Additive Manufacturing Technique - A Review. **Journal of Materials Research and Technology**, pre-proofs, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421004208>> acesso em 06 maio. 2021.
- TELSNIG, T.; WEINREBE, G.; FINKBEINER, J.; ELTROP, L. Life cycle assessment of a future central receiver solar power plant and autonomous operated heliostat concepts. **Solar Energy**, 157, 187 – 200, 2017.
- THE WORLD BANK. **Global Solar Atlas 2.0**. 2019. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/latin-america-and-caribbean>> Acesso em: 17 maio. 2021.
- TOKORO, C.; NISHI, M.; TSUNAZAWA, Y. Selective grinding of glass to remove resin for silicon-based photovoltaic panel recycling. **Advanced Powder Technology**, 32, 841-849, 2021.
- TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 28, 555 – 565, 2013.
- ONU. **World Population Prospects The 2015 Revision - Key Findings and Advance Tables**. Department of Economic and Social Affairs, No. ESA/P/WP.241. New York, 2015. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf> Acesso em: 04 mar. 2021.

- ONU. **World Population Prospects 2019: Highlights**. 2019. Disponível em: <
<https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html#:~:text=World%20Population%20Prospects%202019%3A%20Highlights,-17%20June%202019&text=The%20world's%20population%20is%20expected,United%20Nations%20report%20launched%20today.>> Acesso em: 04 mar. 2021.
- VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2ª Ed., São Paulo, Érica / Saraiva, p. 224, 2015.
- VINCI, G.; D'ASCENZO, F.; ESPOSITO, A.; MUSARRA, M.; RAPA, M.; ROCCHI, A. A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation. **Journal of Cleaner Production**, 223, 587-595, 2019.
- VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, 22 (2), 195- 219, 2002.
- WAN, Y.; GUO, W. -H.; XIAO, J.; YAN, D. -Z.; ZHAO, X.; GUO, S. -H.; LIU, J. -H.; ZHONG, Q. -F.; YANG, T.; ZHAO, Y.; CHANG, X.; GAO, X. Integrated UV-based Photo microreactor-distillation Technology Toward Process Intensification of Continuous Ultra -high -purity Electronic -grade Silicon Tetrachloride Manufacture. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 28, 9, 2248 – 2255, 2020.
- WANG, C.; CHENG, X.; SHUAI, C.; HUANG, F.; ZHANG, P.; ZHOU, M.; LI, R. Evaluation of energy and environmental performances of Solar Photovoltaic-based Targeted Poverty Alleviation Plants in China. **Energy for Sustainable Development**, 56, 73 – 87, 2020.
- WANG, Y.; WANG, Y.; PENG, C.; PENG, T. Environmental Impact Minimization via Production Planning for Aluminum Billet Molding Process. **Procedia CIRP**, 98, 169-174, 2021.
- WEIßBACH, D.; RUPRECHT, G.; HUKE, A.; CZERSKI, K.; GOTTLIEB, S.; HUSSEIN, A. Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. **Energy**, 52, 210 - 221, 2013.
- WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. Ecoinvent report, 1, 3, 2013. Disponível em:<
https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf>
 Acesso em: 17 de mar. 2021.
- WEIDEMA, B. P.; EKVALL, T.; HEIJUNGS, R. **Guidelines for applications of deepened and broadened LCA**. Chapter for CALCAS project. Deliverable D18.

2009. Disponível em: <<https://lca-net.com/publications/show/guidelines-applications-deepened-broadened-lca/>>. Acesso em: 21 mar. 2021.

- WILD-SCHOLTEN, M. J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 119, 296 – 305, 2013.
- XIE, M.; RUAN, J.; BAI, W.; QIAO, Q.; BAI, L.; ZHANG, J.; LI, H.; LV, F.; FU, H. Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multicrystalline photovoltaic production based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, 184, 648 – 659, 2018.
- XU, Y., LI, J., TAN, Q., PETERS, A. L., YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: a review. **Waste Management**, 75, 450–458, 2018.
- YAMAGUCHI, M.; TAKAMOTO, T.; ARAKI, K. Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 90, 3068 – 3077, 2006.
- YAMAMOTO, N. A. D. **Células solares orgânicas baseadas nas estruturas heterojunção em bicamada e heterojunção de volume**. Tese de Doutorado em Física – UFPR – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. **Solar Energy**, 105, 669 – 678, 2014.