

Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen

Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico:
análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil

Belo Horizonte
2020

Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen

Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico:
análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito à obtenção do título de mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Área de concentração: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientadora: Andréa Franco Pereira

Belo Horizonte
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

K88a

Kozen, Bárbara Anne Dalla Vechia.

Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico [manuscrito]: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil/ Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen. - 2020.

127 f.: il.

Orientadora: Andrea Franco Pereira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Energia Solar – Teses. 2. Geração de energia fotovoltaica - Teses. 3. Sustentabilidade – Teses. 4. Impacto ambiental – Teses. 5. Energia – Fontes alternativas - Teses. I. Pereira, Andrea Franco. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 621.473

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DA ALUNA Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen, nº de matrícula 2018710774, DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL DA ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Aos vinte e dois dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte, às quatorze horas e trinta minutos, por meio de videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação para julgar o trabalho “Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso localizado no Sul do Brasil”, requisito para a obtenção do grau de Mestre, na área de concentração “Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável”. Abrindo a sessão, a orientadora, professora doutora Andréa Franco Pereira, após expor as Normas Regulamentares do Trabalho Final, pediu para a aluna iniciar a apresentação do trabalho. Seguiu-se arguição pelos examinadores com a respectiva defesa da candidata. Logo após a comissão reuniu-se, sem a presença da mestranda e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado

(X) Aprovação

() Aprovação com solicitação das revisões constantes nesta ata, no prazo de ____ dias

() Reprovação

Obs:.....
.....
.....
.....

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

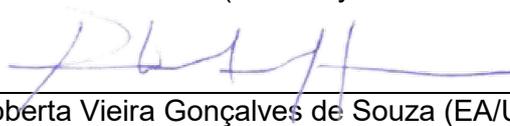
Comissão Examinadora:



Prof. Dra. Andréa Franco Pereira (PACPS/UFMG - orientadora)



Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza (Fiat Chrysler Automóveis)



Prof. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza (EA/UFMG)

Ciente:

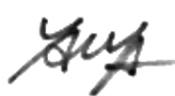


Aluna Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen

Belo Horizonte, 22 de setembro de 2020.

Homologado pelo Colegiado do Programa dos cursos de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável em

Coordenador (a):



Prof. Dra. Yacy-Ara Froner
Coordenadora
Programa de Pós-Graduação em Ambiente
Construído e Patrimônio Sustentável (PACPS)
Escola de Arquitetura/UFMG
Prof. Dra. Yacy Ara Froner Gonçalves “ad referendum”

Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen

“Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso localizado no Sul do Brasil”

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais e aprovada pela banca examinadora.

Comissão Examinadora:



Profa. Dra. Andréa Franco Pereira (PACPS/UFMG - orientadora)



Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza (Fiat Chrysler Automóveis)



Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza (EA/UFMG)

Belo Horizonte, 22 de setembro de 2020.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura e Design da UFMG, por acolher essa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio (Código de Financiamento 001).

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

À orientadora Andrea Pereira, por ser a grande apoiadora, e principalmente, por transmitir a segurança de que estivemos sempre no caminho certo.

À empresa Sonnen Energia, por formalizar a parceria para essa pesquisa, e seus colaboradores, por se colocarem sempre disponível para a troca de informações.

À Ecoinvent por disponibilizar a base de dados para fins acadêmicos, embasando o desenvolvimento dos resultados desta pesquisa.

À minha família, por serem os maiores incentivadores à carreira e à vida acadêmica que escolhi. Em especial, à minha mãe, Carmem Lúcia Dalla Vechia, por apoiar toda e qualquer decisão, por ser exemplo e porto seguro.

Aos meus colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, por dedicarem sua vida à pesquisa independente das circunstâncias.

A todos aqueles que trabalharam em prol da saúde por todo o mundo, em meio a pandemia nesse ano de 2020.

À minha mãe,
Carmem Lúcia Dalla Vechia.

RESUMO

No Brasil, a alta insolação, o rápido desenvolvimento do setor e o barateamento dos produtos, fazem com que, cada vez mais, a população tenha acesso à instalação de sistemas de energia solar em suas propriedades. Contudo, apesar dos ganhos ambientais alcançados na etapa de uso desses sistemas, observa-se que há poucos estudos sobre os impactos gerados nas demais etapas do ciclo de vida, tais como produção e fim de vida. Estudos recentes mostram que nas próximas décadas, grande volume de painéis fotovoltaicos se encontrará obsoleto. Assim, a partir de abordagem interdisciplinar, envolvendo conhecimentos relativos à eficiência energética em arquitetura e design de produtos, esta pesquisa busca analisar os impactos ambientais do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos instalados em edificações no Brasil. Utiliza-se da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), definida pela Norma ISO 14040, como método para quantificar o fluxo de entradas e saídas de material, energia e resíduo, em sistemas de produto industriais, permitindo o cálculo do impacto ambiental em diversas categorias, e neste caso, utilizando do software OpenLCA. Sendo assim, os resultados da ACV de um sistema de painel fotovoltaico são analisados nas diferentes categorias de impacto, sobretudo, tendo em vista a obsolescência desses sistemas em cenários futuros próximos. Os resultados mostraram que a produção do painel, e da célula fotovoltaica em específico, são as etapas do ciclo de vida que causam os impactos ambientais mais representativos, independentemente das estratégias de fim de vida analisadas. Acerca do fim de vida, ao se comparar situações de aterro sanitário e incineração, os resultados mostraram que o processo isolado de aterro sanitário representa maiores impactos, entretanto, transportes e distâncias percorridas precisam ser levadas em consideração para a análise do cenário geral do sistema analisado. Deste modo, esta pesquisa ratifica a pertinência da elaboração de estudos de caso de ACV para resultados válidos de impacto ambiental a partir da análise holística do ciclo de vida.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, Energia solar, Painel fotovoltaico, Impacto ambiental, Sustentabilidade.

ABSTRACT

In Brazil, the high sunshine, the fast sector development and the product cost reduction, facilitated the populations access to the solar energy systems installation in their properties. However, despite the environmental benefits in these systems use phase, it is observed that there are few studies about the impacts generated in other stages, such as production and end-of-life. Recent studies demonstrate that in the coming decades, a large amount of photovoltaic panels will be obsolete. Thus, from an interdisciplinary approach, involving knowledge related to energy efficiency in architecture and product design, this research seeks to analyze the environmental impacts caused in a photovoltaic panel system life cycle installed in brazilian buildings. Defined by ISO 14040, the Life Cycle Assessment (LCA) is used as a method to quantify the inputs and outputs flows of material, energy and waste in industrial product systems, allowing the environmental impact calculation in several categories, and in this case, through the OpenLCA software. Therefore, the LCA results of a photovoltaic panel system are analyzed in different impact categories, especially these systems obsolescence in near future scenarios. The results demonstrate that the photovoltaic panel production, and specially the photovoltaic cell production, are the life cycle phase that causes the most relevant environmental impacts, regardless the end-of-life strategy. About the end-of-life, when comparing landfill and incineration situations, the results showed that the isolated landfill process represents most relevant impacts, however, transport and distances need to be taken into account for the system general scenario analysis. In this way, this research confirms the pertinence of the LCA elaboration of case studies for valid results of environmental impact from the holistic lyfe cycle analysis.

Key-words: Life Cycle Assessment, LCA, Solar energy, Photovoltaic panel, Environmental impact, Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de análise.....	18
Figura 2 – Geração de eletricidade mundial por fonte, de1990 a 2018.....	21
Figura 3 – Capacidade instalada mundial de energia solar em 2019.....	21
Figura 4 – Geração de eletricidade brasileira por fonte, de1990 a 2018.....	22
Figura 5 – Geração de eletricidade chinesa por fonte, de1990 a 2018.....	23
Figura 6 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	23
Figura 7 – Participação das Fontes na Capacidade Instalada.....	24
Figura 8 – Participação setorial no consumo de eletricidade.....	25
Figura 9 – Usina Solar Fotovoltaica do Estádio Mineirão.....	26
Figura 10 – Esquema da produção da célula de Silício Monocristalino.....	27
Figura 11 – Esquema da produção a célula de Silício Policristalino.....	27
Figura 12 – Composição de modelo genérico de painel fotovoltaico.....	28
Figura 13 – Tipos comuns de configuração de backsheet.....	29
Figura 14 – Estimativa dos índices de resíduos fotovoltaicos para Europa.....	32
Figura 15 – Estimativa dos índices de resíduos fotovoltaicos para Austrália.....	32
Figura 16 – Limites do sistema de ACV.....	44
Figura 17 – Representação das entradas e saídas da base de dados da Ecoinvent no OpenLCA para o processo de produção do vidro solar, como exemplo.....	46
Figura 18 – Representação da média de materiais que compõem um módulo fotovoltaico comum de silício.....	51
Figura 19 – Esquema representativo da cadeia produtiva da indústria fotovoltaica..	51
Figura 20 – Ilustração do ciclo de vida do silício para painel fotovoltaico.....	52
Figura 21 – Exemplo de fluxos da geração de energia por sistemas fotovoltaicos....	52
Figura 22 – Esquema de processos de produção e alternativas de reciclagem.....	53
Figura 23 – Processos e fluxos da produção de um sistema fotovoltaico CIGS.....	53

Figura 24 – Inventário da ACV de fim de vida de backsheet.....	54
Figura 25 – Foto da instalação analisada como estudo de caso.....	69
Figura 26 – Ciclo de vida do painel fotovoltaico.....	71
Figura 27 – Diagrama preliminar do Inventário do Ciclo de Vida.....	73
Figura 28 – Diagrama final do Inventário do Ciclo de Vida.....	74
Figura 29 – Representação dos Fluxos e Processos criados no OpenLCA.....	79
Figura 30 – Sistema de Produto referente aos Cenários 1 e 2.....	83
Figura 31 – Sistema de Produto referente ao Cenário 3 e 4.....	84
Figura 32 – Resultados das 13 categorias de impacto para todos os cenários.....	85
Figura 33 – Resultados quantitativos das categorias de impacto para todos os cenários.....	86
Figura 34 – Resultados das categorias de impacto mais representativas.....	89
Figura 35 – Resultado dos 4 cenários para mudanças climáticas totais.....	90
Figura 36 – Resultado para mudanças climáticas totais nos Cenários 1-4, respectivamente.....	91
Figura 37 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto a acidificação terrestre e de água doce.....	92
Figura 38 – Resultado para qualidade do ecossistema quanto a acidificação terrestre e de água doce nos Cenários 1-4, respectivamente.....	93
Figura 39 – Resultado dos 4 cenários para mudanças climáticas quanto ao uso e transformação do solo.....	94
Figura 40 – Resultado para mudanças climáticas quanto ao uso e transformação do solo nos Cenários 1-4, respectivamente.....	95
Figura 41 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto à eutrofização terrestre.....	96
Figura 42 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto a ecotoxicidade de água doce.....	96
Figura 43 – Resultados para contribuição de dióxido de carbono no ar nos Cenários	

1-4, respectivamente.....	98
Figura 44 – Resultados para mudanças climáticas totais nos Cenários 1-2 e 3-4, respectivamente.....	99
Figura 45 – Resultados para contribuição de dióxido de carbono no ar nos Cenários 1-2 e 3-4, respectivamente.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias e Subcategorias de Impacto do modelo de cálculo ILCD 2.0 2018.....	48
Tabela 2 – Compilação Revisão Bibliográfica ACV.....	56-58
Tabela 3 – Categoria de impacto analisadas pelos estudos de Revisão Bibliográfica.....	59
Tabela 4 - Características mecânicas do módulo solar policristalino AS-6P Amerisolar.....	68
Tabela 5 – Massa dos componentes quanto a porcentagem.....	76
Tabela 6 – Representação dos cenários criados.....	77
Tabela 7 – Fluxos.....	78
Tabela 8 – Processos.....	79
Tabela 9 – Referências e dados quantitativos para a produção do Módulo Fotovoltaico.....	80
Tabela 10 – Referências e dados quantitativos para a produção da Estrutura SolarFix.....	81
Tabela 11 – Referências e dados quantitativos para a instalação do Sistema.....	82
Tabela 12 – Referências e dados quantitativos para a Gestão do Fim de Vida.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviatura	Inglês	Português
CIGS/CIS	<i>Cooper Indium Galium Selenide</i>	Cobre Índio Gálio Seleneto
CN	<i>China</i>	China
C-Si	<i>Crystalline Silicon</i>	Silício Cristalino
EPBT	<i>Energy payback time</i>	Tempo de payback de energia
EVA	<i>Ethylene vinyl acetate</i>	Acetato-vinilo etileno
Multi-Si	Multi-crystalline Silicon	Silício Multicristalino
RSU	-	Resíduos Sólidos Urbanos
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>	Polietileno tereftalato
P-Si	<i>Polycrystalline</i>	Silício Policristalino
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i>	Fluoreto de Polivinilideno
S-Si	<i>Monocrystalline</i>	Silício Monocristalino
SoG-Si	<i>Solar grade silicone</i>	Silício de grau solar

LISTA DE SÍMBOLOS OU FÓRMULAS *

Símbolo/Fórmula	Inglês	Português
Ag	<i>Silver</i>	Prata
Cd	<i>Cadmium</i>	Cádmio
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i>	Telureto de Cádmio
CO₂	<i>Carbon Dioxide</i>	Dióxido de Carbono
Cu	<i>Copper</i>	Cobre
Ga	<i>Gallium</i>	Gálio
In	<i>Indium</i>	Índio
kWh	<i>Quilowatt-hour</i>	Quilowatt-hora
m²	<i>Square meters</i>	Metros quadrados
MW	<i>Megawatts</i>	Megawatts
nmi	<i>Nautical mile</i>	Milha náutica
Pb	<i>Lead</i>	Chumbo
SO₂	<i>Sulfur Dioxide</i>	Dióxido de Enxofre
Ton	<i>Tonne</i>	Toneladas

*unidades de medida e elementos químicos

LISTA DE ESTRANGEIRISMOS *

Sigla	Inglês	Português
	<i>Amount</i>	Quantidade
	<i>Database</i>	Base de dados
	<i>Flow name</i>	Nome do fluxo
	<i>Flow Type</i>	Tipo do fluxo
GLO	<i>Global</i>	Global
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>	Instituto Internacional de Alumínio
	<i>Input Flows</i>	Fluxo de entrada
	<i>Product</i>	Produto
	<i>Mass</i>	Massa
	<i>Output Flows</i>	Fluxo de Saída
	<i>Process</i>	Processo
	<i>Provider</i>	Fornecedor
	<i>Quantitative Reference</i>	Referência Quantitativa
RER	<i>Europe</i>	Europa
RoW	<i>Rest-of-the-World</i>	“resto” do mundo
	<i>Unit</i>	Unidade

*Termos técnicos utilizados pelo *Software* OpenLCA para a elaboração da metodologia da pesquisa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Metodologia.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Panorama Energético.....	20
2.2	Energia solar fotovoltaica.....	25
2.3	Gestão de resíduos.....	33
2.3.1	Regulamentação Internacional: a Diretiva Europeia.....	36
2.3.2	Regulamentação Nacional.....	38
2.4	O método de Avaliação do Ciclo de Vida.....	43
2.5	Estudos acerca dos impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos.....	49
2.5.1	Estudos de ACV de painéis fotovoltaicos.....	50
2.5.2	Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos.....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1	Definição do objetivo e do escopo.....	67
3.2	Análise do Inventário.....	70
3.2.1	Definição dos processos.....	70
3.2.2	Modelo de Sistema Geral do Inventário do Ciclo de Vida.....	72
3.2.3	Dados Quantitativos.....	75
3.3	Avaliação dos Impactos.....	86
4	DISCUSSÃO: INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	101
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE A – DADOS EMPRESA SONNEN ENERGIA.....	116

APÊNDICE B – CARTA DE INTERESSE – SONNEN ENERGIA.....	118
APÊNDICE C – RELATÓRIO RESULTADO DO OPENLCA	119

1 INTRODUÇÃO

Constantemente, utiliza-se da palavra “sustentabilidade” fundamentada por senso comum para se referir a alternativas de reduzido impacto ambiental, disseminando a ideia da otimização de recursos naturais. O termo se desdobra do conceito de Desenvolvimento Sustentável elaborado em Conferências da ONU para o Meio Ambiente, com destaque às de Estocolmo de 1972 e do Rio de 1992 (SACHS, 2009), e abarca aspectos sociais, econômicos e culturais. A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1991, p.49) define: “Para haver um desenvolvimento sustentável, é preciso minimizar impactos adversos sobre a qualidade do ar, da água, e de outros elementos naturais, a fim de manter a integridade natural do ecossistema”.

Sustentabilidade pode ser associada à economia, estabilidade, eficiência e durabilidade. Pode-se empregar o termo ao se referir a algo capaz de se sustentar, manter-se estável, em equilíbrio ou ainda garantindo a eficiência de sua função. Por exemplo, é possível dizer que a sustentabilidade de um sistema pode ser a garantia de sua eficiência, ou ainda, referir-se à “sustentabilidade econômica” para a capacidade de assegurar recursos de uma instituição e sua estabilidade financeira.

Visando a sustentabilidade na arquitetura, pode-se, por exemplo, considerar a utilização de estratégias de baixo impacto ambiental para garantir a eficiência e a otimização de uso das construções. Ao se abordar estratégias de sustentabilidade é possível promover o equilíbrio entre o meio ambiente e o desenvolvimento humano, garantindo satisfação econômica, social e cultural.

Uma das tendências atuais, ao se implementar ações de modernização de edificações é a instalação de sistemas de geração de energia distribuída (HEYWOOD, 2017), ou seja, instalações de unidades consumidoras conectadas à rede de distribuição (ANEEL, 2015), como forma de aproveitar o potencial energético do edifício, promover autonomia aos usuários e economia de recursos a longo prazo. Essa tendência de geração de energia distribuída pode trazer benefícios ambientais ao fazer uso de energia renovável e econômicos ao reduzir o consumo de energia fornecida pela concessionária. Porém, ainda cabem estudos que avaliem o impacto ambiental dessa descentralização da geração de energia, ainda que esta, utilize de fontes renováveis.

A geração e energia solar fotovoltaica utiliza de fonte livre de combustíveis fósseis e, em fase de uso, não emite gases de efeito estufa (RAHMAN; ALAM; AHSAN, 2019). Ainda assim, existe espaço para pesquisa do ciclo de vida desses produtos, como etapas de produção e gestão de resíduos, para que sejam mais eficientes e causem menores impactos ambientais.

No Brasil, o mercado de painéis fotovoltaicos cresce exponencialmente a cada ano, assim como a capacidade instalada de energia solar. Dados da ABSOLAR (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR, 2020), mostram que a potência instalada no Brasil em 2017 era de 1159 MW (megawatts), aumentou para 2414 MW em 2018, para 4581 MW em 2019, e já passou dos 6700 em 2020. Isso faz da energia solar fotovoltaica centralizada responsável por 1,7% da Matriz Elétrica brasileira atual. Por isso, em virtude desse significativo progresso do setor, cabem discussões acerca dos impactos ambientais desse sistema.

A economia de energia, recursos e o tempo de retorno financeiro (*payback*) são alguns dos principais motivos para sua implantação (ESTADÃO, 2018). No entanto, do ponto de vista da sustentabilidade, algumas etapas do ciclo de vida do sistema podem ser causadoras de altos índices de impacto ambiental. As emissões de poluentes e gases de efeito estufa da industrialização e do transporte podem consumir tanta energia quanto será gerada pelo produto em toda etapa de uso (HEYWOOD, 2017).

O Brasil é considerado um país com grande potencial energético para a geração de energia solar. Porém, mesmo em fase de avanço, o mercado fotovoltaico ainda se encontra relativamente atrasado em relação a outros países mais desenvolvidos no setor. O que demonstra que, ainda que os painéis fotovoltaicos possuam uma média de 25 anos de vida útil (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019), há tempo hábil para propor alternativas, prever e gerenciar os impactos ambientais causados pelo fim de vida das células fotovoltaicas, componentes de complexa reciclagem e reuso.

Aliando-se o crescimento do setor fotovoltaico ao potencial energético do país e, simultaneamente, às normas que orientam para a reciclagem do sistema e/ou incentivam a incorporação de materiais reciclados, ratifica-se a ascensão do setor e potencial contribuinte para a geração de grandes volumes de resíduos em cenário futuro. Deste modo, questiona-se o fato de que utilizar de fonte de energia renovável

não basta para que se possa considerar uma geração de energia “limpa”. Assim, o emprego de sistemas de energia solar fotovoltaica, portanto, de fonte renovável, não garante a diminuição do impacto ambiental no âmbito de geração de energia.

Considerando o avanço do setor no Brasil e a carência de estudos de impacto ambiental do sistema em nível nacional, aliados a pesquisas sobre a vida útil e obsolescência de um grande número de painéis na próxima década (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019; MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2019), apresenta-se como um campo de pesquisa que ainda demanda desenvolvimento.

Para se obter dados relativos ao impacto ambiental passíveis de comparação, utiliza-se do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV pode ser considerada um método de cálculo ou ferramenta que permite quantificar o impacto ambiental de produtos orientada em específico pelas diferentes fases do ciclo de vida. No caso desta pesquisa, incluindo processos produtivos, logística de distribuição, uso, manutenção, desmontagem e gestão do fim de vida.

Por isso, identifica-se a demanda por estudos que quantifiquem os impactos atuais e investiguem as futuras alternativas para o setor. Por meio dessa avaliação do ciclo de vida, é possível elaborar tal comparação de modo quantitativo e realista. Sendo assim, essa pesquisa se justifica como meio de análise de impacto ambiental desse produto que segue progredindo no Brasil, e como fundamentação para uma análise crítica das alternativas e implicações do fim de vida desse sistema.

Grande parte dos estudos já analisados como fundamentação para esta pesquisa aplicam-se a países estrangeiros. Por isso, o caráter singular de trabalhos de ACV, justifica a validade da aplicação do método para um caso de estudo brasileiro. Espera-se a partir deste, fundamentação teórica suficiente para identificar etapas do ciclo de vida em que possam ser propostas estratégias de mitigar o impacto ambiental causado pelo ciclo de vida desse produto.

Deste modo, essa pesquisa aborda a Avaliação de Ciclo de Vida de um modelo de painel fotovoltaico, quantificando o impacto ambiental do sistema instalado no Brasil e discutindo sua sustentabilidade. A partir dessa análise, almeja-se responder a seguinte questão: quais os impactos ambientais causados pelo ciclo de vida de painéis fotovoltaicos e quais as implicações de seu fim de vida no Brasil?

1.1 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é apresentar embasamento para uma análise quantitativa de impacto ambiental, visando proporcionar uma discussão que extrapole o senso comum acerca do conceito de sustentabilidade ambiental no âmbito dos sistemas de geração de energia renováveis, por meio de aplicação do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Deste modo, identificar os impactos ambientais causados pelo ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos no Brasil e as implicações de seu fim de vida.

Os objetivos específicos serão alcançados por meio das principais etapas deste trabalho, as quais incluem:

- Caracterizar o mercado da energia solar fotovoltaica no Brasil;
- Levantar as etapas, processos e fluxos do ciclo de vida de uma tipologia de painéis fotovoltaicos utilizada no Brasil, a fim de determinar o inventário do ciclo de vida;
- Levantar as possibilidades de fim de vida dos painéis fotovoltaicos e caracterizar suas implicações em nível nacional;
- Elaborar a ACV de modelo de painel fotovoltaico e, por meio desta, identificar quais impactos ambientais causados pelo ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos no Brasil.

1.2 Metodologia

Como fundamentação inicial para esta pesquisa foi utilizado o Manual de Investigação em Ciências Sociais, de Quivy e Campenhoudt (2005), orientando o desenvolvimento inicial para a definição de pergunta de partida, problema, pressupostos, variáveis, conceitos e o modelo de análise inicial.

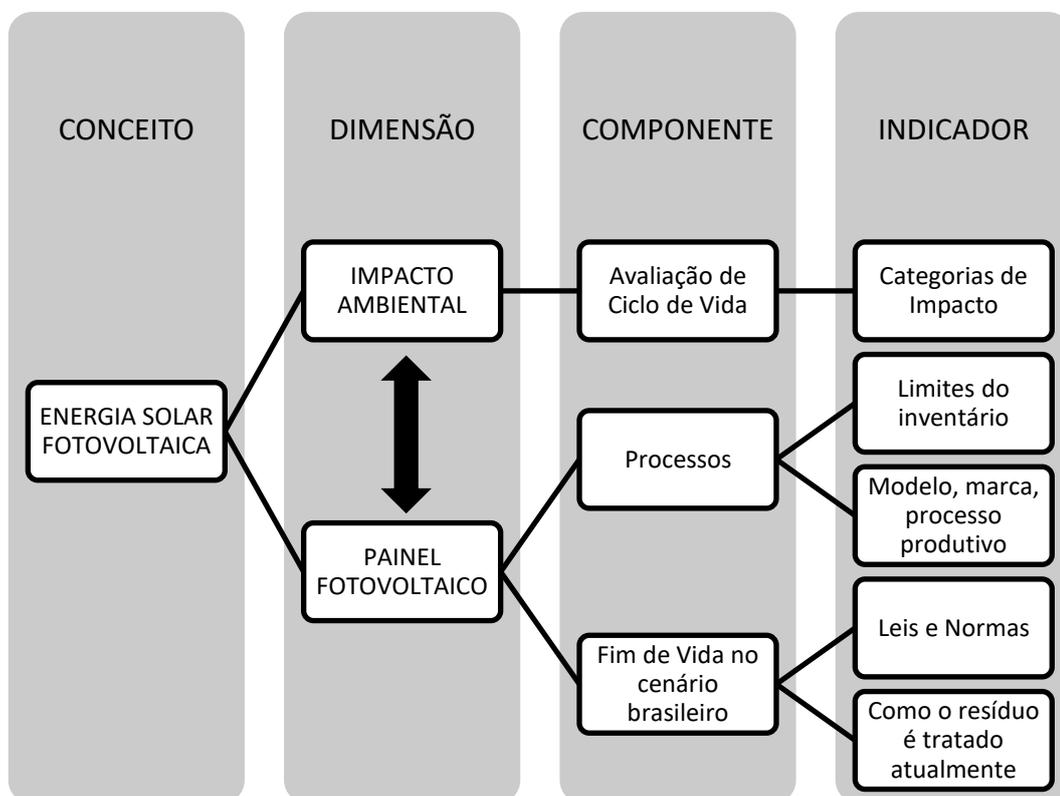
A **pergunta de partida** ficou definida como: quais são os impactos ambientais causados pelos painéis fotovoltaicos e quais são as implicações de seu fim de vida no Brasil? Pois considera-se como **problema** de pesquisa, o grande volume de resíduo a ser descartado nas próximas décadas, considerando o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos de aproximadamente 25 anos, o mercado em crescimento, e as adaptações ao novo Acordo Setorial de Resíduos Eletroeletrônicos.

Como **suposição**, considera-se que a energia solar fotovoltaica, de fonte renovável e de modo descentralizado, não seja isenta de impactos ambientais, além de ser considerada como de baixo impacto por senso comum, e pode causar relevantes impactos ambientais tanto em fase de produção quanto na gestão do fim de vida. Se faz necessário uma análise que englobe mais etapas do ciclo de vida do sistema, pois o uso de fonte de energia renovável não basta para que a geração de energia possa ser considerada “limpa”.

Sendo assim, as principais **variáveis** nesta pesquisa são os impactos ambientais. Buscou-se obter resultados quantitativos como resultado desse estudo a fim de orientar tais análises. Alguns **conceitos** como impacto ambiental, ciclo de vida, energia renovável, geração de energia distribuída e gestão de resíduos, são discutidos para a fundamentação da pesquisa e a revisão bibliográfica.

Como orientam Quivy e Campenhoudt (2005), foi elaborado um modelo de análise, representado conforme a Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Modelo de análise.



Fonte: elaborado pela autora fundamentado em por Quivy e Campenhoudt (2005).

A fundamentação teórica foi elaborada por meio de pesquisa em livros, teses e dissertações, e artigos publicados em periódicos ou anais de eventos. Tal abordagem fundamenta discussão teórica, justificativa e elucidação dos principais conceitos incluídos no trabalho. A revisão bibliográfica para a contextualização do problema e apresentação de estudos já desenvolvidos na área, envolve principalmente a busca por artigos disponíveis em Periódicos no Portal de Periódicos CAPES, atualizados e publicados em áreas relacionadas, como por exemplo, geração de energia renovável, energia distribuída, instalação de sistemas de geração de energia renovável em edificações existentes, impacto ambiental e estratégias de análise de ciclo de vida.

A partir disso, como referência para a elaboração da ACV, foi utilizada a NBR ISO 14040, em versão revisada de 2014, aliada a referencial teórico explicativo para o uso do *software* de ACV. Como complemento à pesquisa descritiva para o embasamento acerca do funcionamento do sistema, o trabalho é composto principalmente por pesquisa experimental, por tratar de procedimento de ACV elaborado em *software*.

O *software* utilizado é o OpenLCA, e a base de dados foi fornecida pela Ecoinvent. O OpenLCA é um software para elaboração de ACV criado em 2006 para ser disponibilizado gratuitamente, ou seja, é um programa de acesso livre (OPENLCA, 2020b). O programa disponibiliza algumas bases de dados gratuitas, mas no caso dessa pesquisa, foi utilizada uma base de dados disponibilizada pela Ecoinvent para fins acadêmicos. A Ecoinvent é uma associação sem fins lucrativos responsável por bancos de dados de impacto ambiental para processos de produtos, fundamentando a tomada de decisão orientada por resultados de impacto ambiental (ECOINVENT, 2020b). Quanto aos dados de difícil acesso, foram realizadas estimativas fundamentadas por referências bibliográficas ou outros estudos para que fosse possível concluir o abastecimento de dados no *software*.

Para a utilização do OpenLCA, o sistema é organizado em: fluxos, processos, sistemas de produto, projetos, resultado e relatório. A última etapa envolve a análise, permitindo comparações, identificação de etapas que demandam melhorias, e proposição de soluções, por exemplo. A partir dessa organização dos fluxos e processos, é possível vincular o inventário com as bases de dados, gerando o resultado. O relatório final apresenta os dados quantitativos de cada categoria de impacto discriminados por processo. Nesse caso, analisou-se o ciclo de vida dos

painéis fotovoltaicos no Brasil, identificando os processos que causam maior degradação ao meio ambiente, permitindo a interpretação do ciclo de vida do sistema e a identificação de alternativas a estes agravantes.

A ACV elaborada engloba um estudo de caso brasileiro, partindo de dados de situações reais, para que seja possível determinar localizações, fluxos, materiais e limites do inventário, além de proporcionar uma percepção mais realista do impacto ambiental gerado pelo ciclo de vida no sistema instalado em território nacional. Deste modo, em contato com a Sonnen Energia, obteve-se acesso a dados quantitativos (APÊNDICE A) mais detalhados de uma das instalações realizada pela empresa.

A Empresa Sonnen Energia localiza-se em Santa Maria, Rio Grande do Sul, e foi escolhida por ser consolidada no mercado há alguns anos, mas, principalmente, por colocar-se a disposição para contato e fornecer os dados quantitativos da instalação. A empresa projeta e produz a estrutura SolarFix para a instalação do painel, comercializa os painéis importados e responsabiliza-se pela instalação do sistema.

Deste modo, a dissertação se organiza em 5 capítulos. Além do capítulo 1 já apresentado, tratando da introdução, objetivos e metodologia, o capítulo 2 trata da fundamentação teórica, percorrendo pelos principais conceitos e revisão bibliográfica para embasamento da pesquisa. O capítulo 3 aborda o levantamento de dados acerca dos processos que compõem o inventário e a aplicação do método de ACV no *software* OpenLCA. O capítulo 4 trata da discussão e interpretação dos resultados encontrados e o capítulo 5, das considerações finais da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

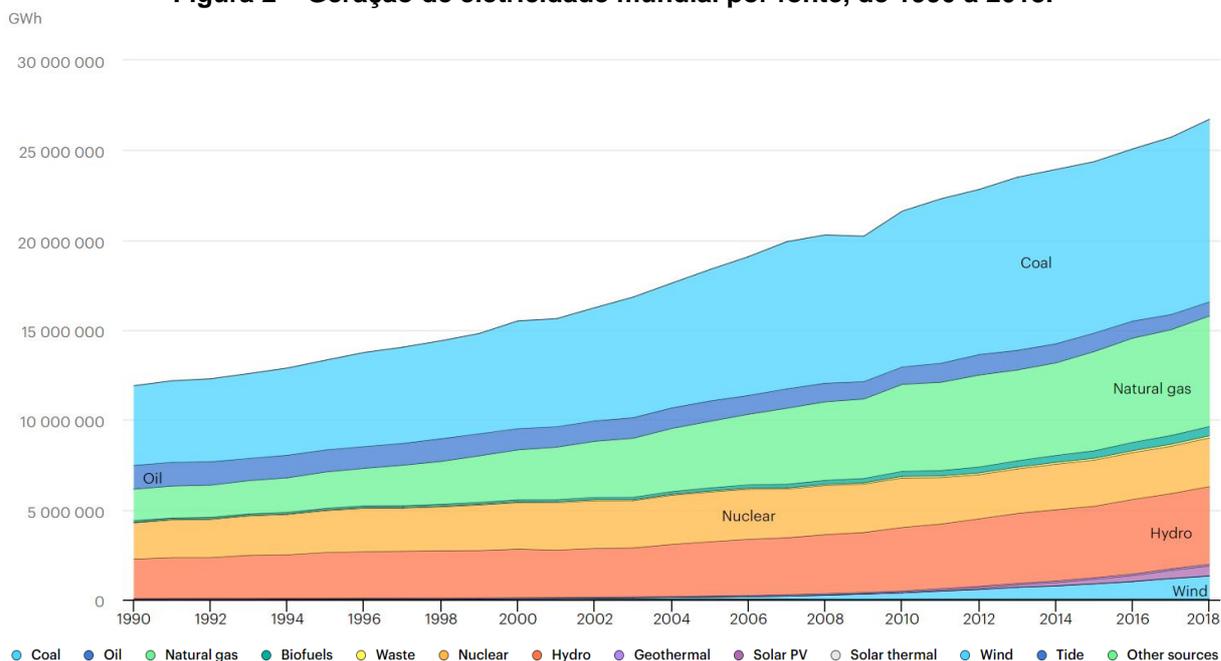
Neste trabalho, primeiramente, são discutidos alguns conceitos que fundamentam a pesquisa como um panorama energético brasileiro e o cenário da energia solar. Em segundo lugar, são apresentadas e discutidas leis e normas já em vigor, referentes a gestão de resíduos e fundamentando a discussão acerca do fim de vida do sistema. A abordagem envolve, em nível internacional, a Diretiva Europeia, a fim de se conhecer a situação atual em países mais desenvolvidos, e em nível nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Acordo Setorial de Resíduos Eletroeletrônicos, a fim de se conhecer o cenário brasileiro atual e as alternativas para o fim de vida do sistema. Em terceiro lugar, trata-se do conceito de Avaliação do Ciclo de Vida e da norma que a orienta. E por último, um levantamento de estudos atualizados já publicados, a fim de estabelecer um estado da arte.

2.1 Panorama Energético

Primeiramente, se faz necessário destacar a diferença conceitual entre as Matrizes Elétrica e Energética. De acordo com definições da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (BRASIL, 2020), a Matriz Energética é o conjunto de fontes de energia disponíveis para suprir determinada demanda, seja mundial, nacional ou estatal. Já a Matriz Elétrica, representa o conjunto de fontes responsáveis pela produção de energia elétrica apenas.

A partir dos dados fornecidos pelos indicadores da Agência Internacional de Energia (IEA, 2020), pode-se perceber que o carvão continua sendo a fonte de energia elétrica predominante no mundo, como demonstra a Figura 2 a seguir. Isso evidencia o fato de que ainda, as principais fontes de energia responsáveis pelo abastecimento da população mundial, não são fontes renováveis, emitem poluentes e causam relevante impacto ambiental, que poderia ser mitigado com a substituição por fontes de energia renováveis, ou mais “limpas”.

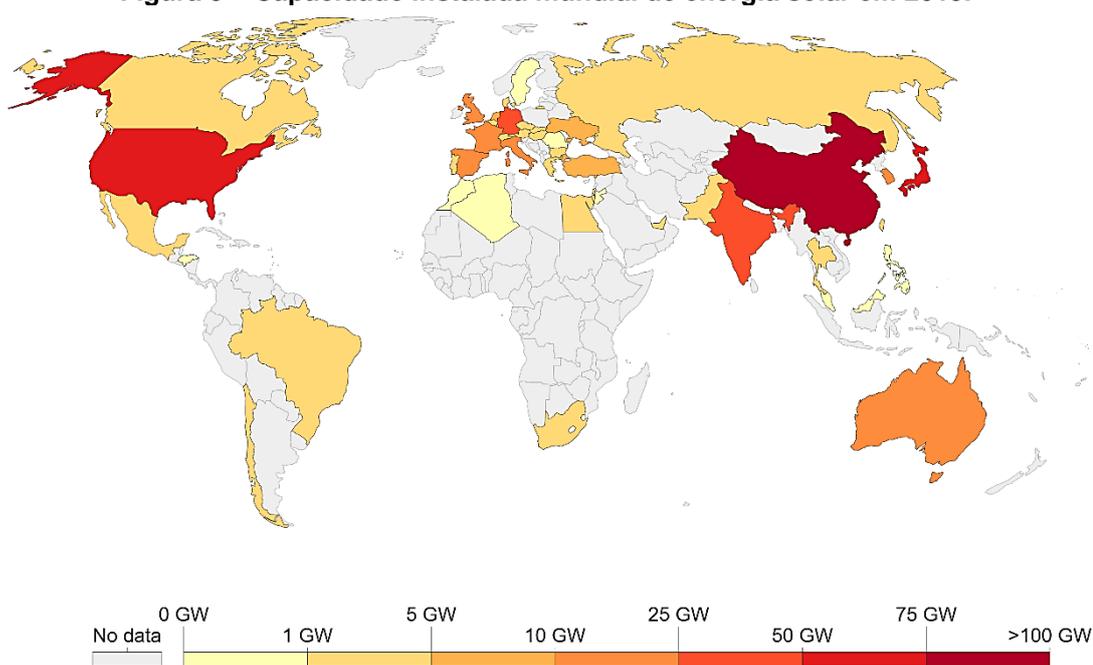
Figura 2 – Geração de eletricidade mundial por fonte, de 1990 a 2018.



Fonte: IEA, 2020.

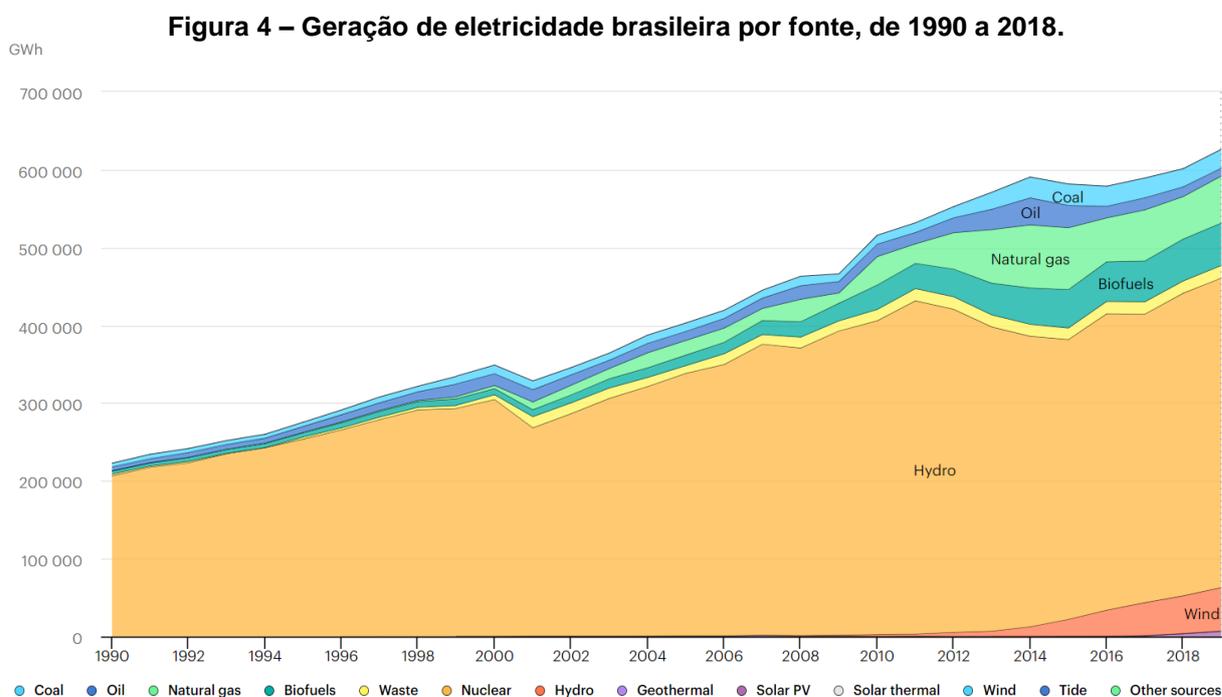
Quanto à capacidade instalada de energia solar, a Figura 3 representa o cenário mundial medido em gigawatts (GW). O mapa mostra a China como o país que mais produz energia por fonte solar, seguida por Estados Unidos, Japão, Alemanha e Índia.

Figura 3 – Capacidade instalada mundial de energia solar em 2019.



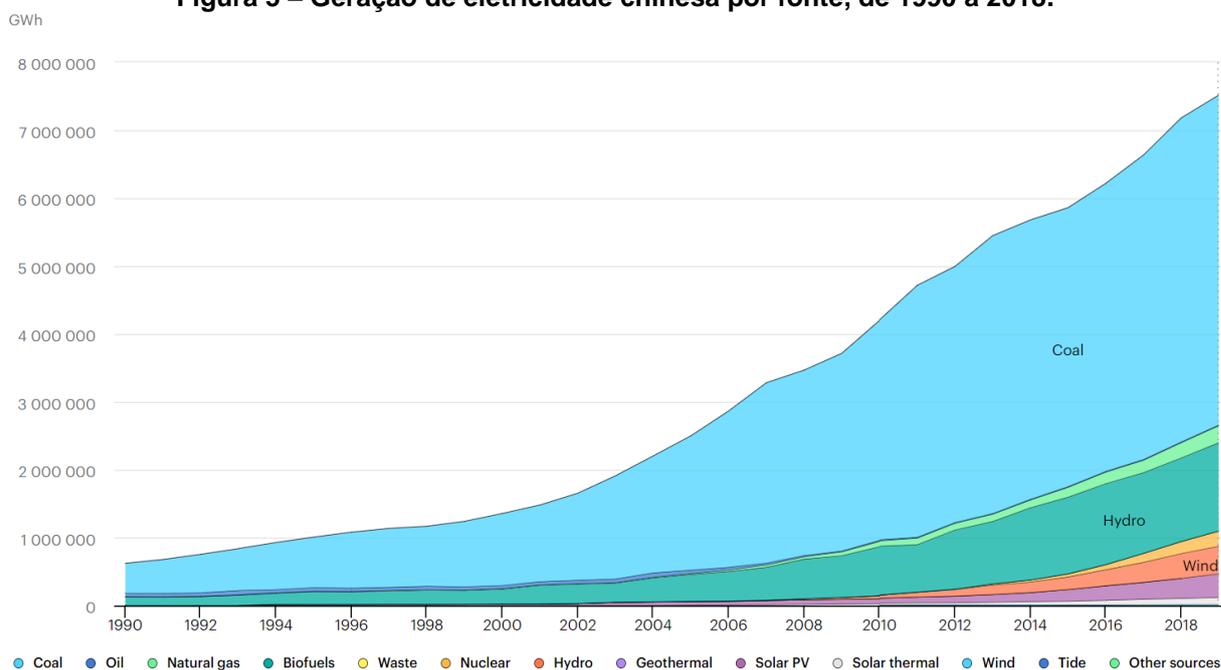
Fonte: Our World in Data, 2020.

Ainda que o Brasil seja um dos países com menor capacidade instalada de energia solar (FIGURA 3), predominam fontes de energia “limpas” para geração de energia elétrica em território nacional (FIGURA 4). Ao longo dos anos, e com o crescimento das demandas por energia, outras fontes também aumentaram sua capacidade instalada, como por exemplo, gás natural e eólica, entre outras. Contudo, apesar de a Matriz Elétrica brasileira não poder ser considerada completamente limpa, por ainda utilizar de algumas fontes de maior impacto ambiental como carvão, quando comparada a outros países, pode-se perceber como o Brasil encontra-se entre os países que mais utilizam de fontes renováveis.



Por exemplo, compara-se as matrizes brasileira (FIGURA 4) e chinesa (FIGURA 5). Embora a China seja o país que mais produz energia de fonte solar (FIGURA 3), ainda utiliza do carvão (*coal*) como principal fonte de energia (FIGURA 5).

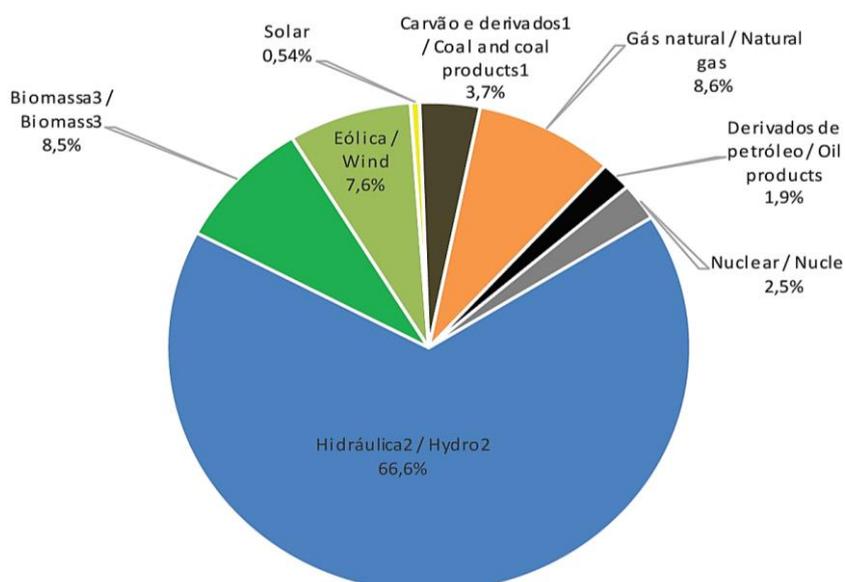
Figura 5 – Geração de eletricidade chinesa por fonte, de 1990 a 2018.



Fonte: IEA, 2020.

A geração de energia elétrica brasileira é predominantemente de fonte renovável (FIGURA 4). Como mostra a Figura 6 a seguir, em 2018, a geração de energia por fonte hidráulica representou 66,6% da oferta interna, a eólica 7,6%, e a solar representava 0,54%. Deste modo, as fontes de energia renovável resultaram em um total de 83,3% (BRASIL, 2019b, p.16).

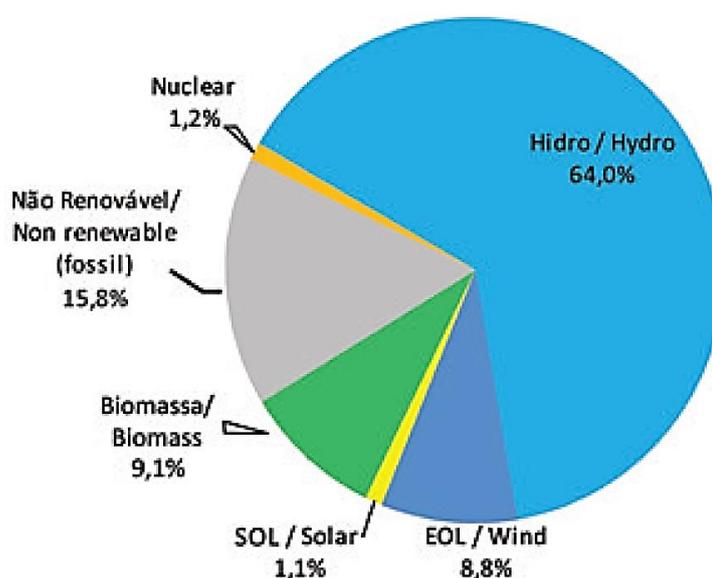
Figura 6 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



Fonte: Brasil, 2019b, p. 16.

O Balanço Energético Nacional (BEN) referente ao ano de 2018 (BRASIL, 2019b, p.17), destaca a que a potência instalada de fonte solar fotovoltaica chegou a 1798 MW em 2018, sendo que havia sido de 935 MW em 2017, e de 24 MW de 2016. Mesmo com tal crescimento, a representação da fonte de energia solar alcançou apenas 1,1% de toda a capacidade instalada para geração de energia elétrica em 2018, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Participação das Fontes na Capacidade Instalada.



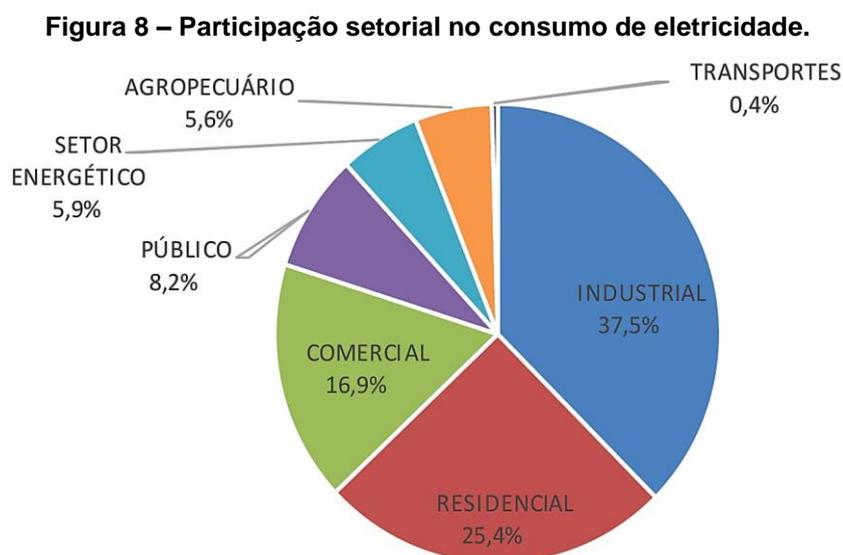
Fonte: Brasil, 2019b, p 19.

Segundo os dados do Balanço Energético Nacional, a energia solar começa a ser contabilizada de modo específico como fonte de energia primária e oferta interna de energia, apenas a partir do ano de 2015. Assim, torna-se facilmente perceptível o exponencial crescimento do setor quando comparado aos dados dos anos anteriores.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, em dezembro de 2019, a energia solar já representava 2,6% na Matriz de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica Brasileira (BRASIL, 2019c), o que demonstra o seu progresso. Além disso, diversos estudos destacam o potencial energético e o crescimento do setor nacional, embasado principalmente pelo barateamento dos painéis.

O Balanço Energético Nacional também apresenta dados referentes a participação dos setores no consumo energético nacional no ano de 2018. Como representa a

Figura 8 a seguir, o setor industrial é o grande consumidor de energia elétrica, representando 37,5%, e seguido pelos 25,4% do setor residencial.



Fonte: Brasil, 2019b, p. 18.

A partir da percepção dos dados expostos nos gráficos, observa-se, que o Brasil é um país que utiliza de fontes de energia “limpas” em maior proporção quando comparado ao panorama mundial. Deste modo, cabe a análise de que, importar produtos e materiais, é uma estratégia que pode causar impacto ambiental muito maior do que a produção nacional. Isso porque, além das emissões dos meios de transporte, toda a energia consumida para a produção e tais produtos em outros países, de modo geral, utiliza de recurso energético mais poluente. Por isso, pode-se perceber que investir na industrialização nacional é uma estratégia mitigadora de impactos ambientais.

2.2 Energia solar fotovoltaica

O setor de energia solar fotovoltaica cresce exponencialmente a cada ano. No primeiro semestre de 2019, os custos do setor caíram 8,9%, o que evidencia seu progresso (BELLINI, 2019). O avanço tecnológico permitiu ampliar a variedade de modelos, resultando em diferentes aplicações.

De modo geral, em centros urbanos, os sistemas são instalados nas coberturas das edificações, independente de demanda ou tipologia de uso. Um exemplo de empreendimento regional, é a Usina Solar do Mineirão (MINAS ARENA, 2016), instalada na cobertura do estádio (FIGURA 9) em 2013 (CEMIG, 2018).

Figura 9 – Usina Solar Fotovoltaica do Estádio Mineirão, Belo Horizonte, Minas Gerais.



Fonte: Minas Arena, 2020.

Atualmente, os modelos de sistemas fotovoltaicos mais encontrados, são a base de silício e ainda podem ser agrupados em três de acordo com algumas especificações (PORTAL SOLAR, 2019c; LUDIN *et al.*, 2018; ZHANG; WANG; YANG, 2018):

- Silício Monocristalino (mono-Si);
- Silício Policristalino ou Multicristalino (P-Si ou multi-Si);
- Filme fino.

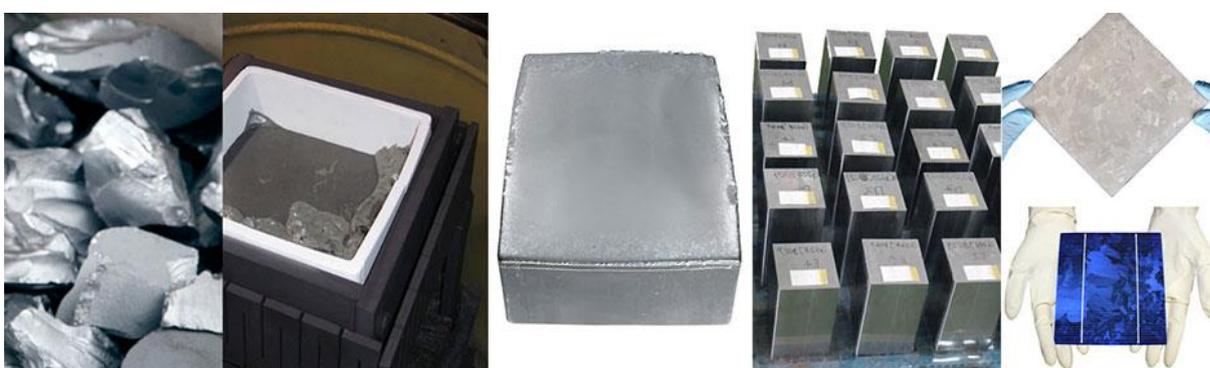
A Portal Solar (2019a) elucida as diferenças dos sistemas mais comuns. O processo produtivo do sistema de Silício Monocristalino, parte do minério de silício ultrapuro, derretido em forno, originando o lingote de silício, que fatiado, resulta em células com cantos arredondados, conforme a Figura 10. Já o sistema de Silício Policristalino, é produzido a partir do bloco de silício, resultando na forma quadrada ou retangular. Conforme a Figura 11, o processo também parte do minério de silício purificado, porém, fundido em blocos de silício, cortados em “tijolos”, e posteriormente, em fatias.

Figura 10 – Esquema da produção da célula de Silício Monocristalino.



Fonte: Portal Solar, 2019a.

Figura 11 – Esquema da produção a célula de Silício Policristalino.



Fonte: Portal Solar, 2019a.

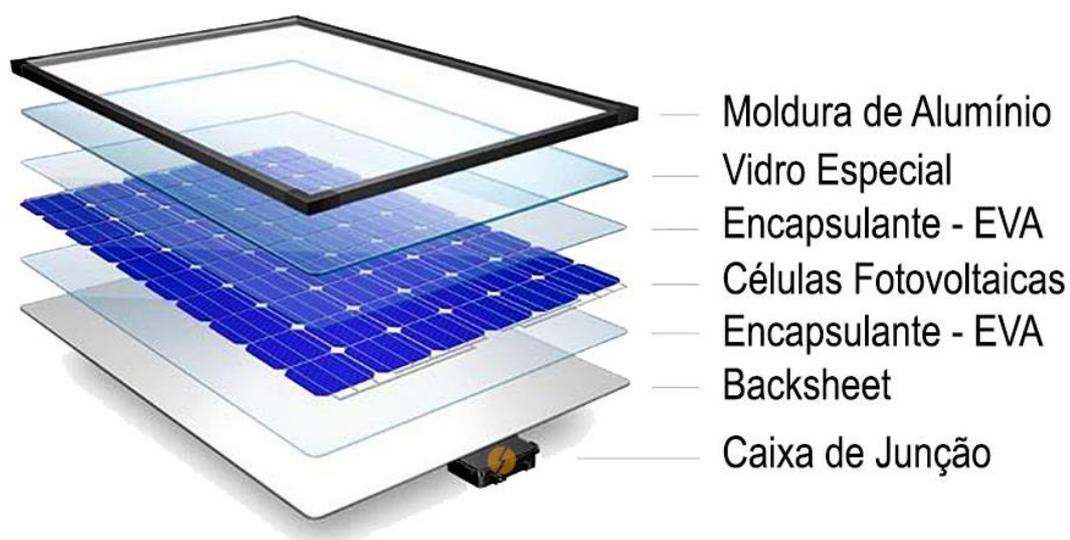
Os sistemas fotovoltaicos filme fino, considerados de segunda geração, são a tipologia mais moderna e mais leve, de custo mais baixo, mas também menos eficiente. A tecnologia ainda é pouco comum no mercado, e também é subdividida em outras três tipologias (AMARAKOON *et al.*, 2018; ZHANG; WANG; YANG, 2018):

- Silício amorfo (a-Si)
- Telureto de Cádmiio (CdTe)
- Cobre Índio Gálio Seleneto (CIGS/CIS)

Além destas, outras novas tecnologias fotovoltaicas vêm sendo desenvolvidas (LUDIN *et al.*, 2018; ZHANG; WANG; YANG, 2018), porém ainda não são comuns no mercado e por isso não serão aprofundadas nesta seção.

Um modelo genérico de painel fotovoltaico (FIGURA 12) é composto por: moldura de alumínio, vidro solar, célula de silício, encapsulante EVA (acetato vinilo-etileno), *backsheet* (camada plástica inferior) e caixa de junção (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019).

Figura 12 – Composição de modelo genérico de painel fotovoltaico.

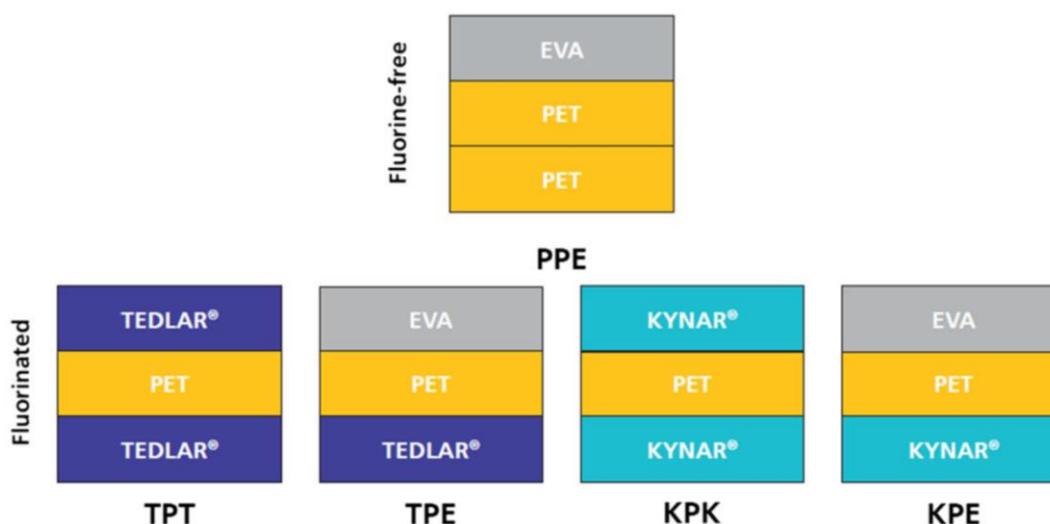


Fonte: Portal Solar, 2019b.

Além desses componentes, para o funcionamento, o sistema ainda depende de uma estrutura para instalação, comumente de alumínio, e do inversor solar. Algumas informações mais específicas desses componentes são detalhadas a seguir:

- **Moldura:** a moldura é comumente o último componente no processo de montagem, e funciona para a estabilidade e fixação do painel. De modo geral, é produzida por perfis de alumínio extrudado e anodizado, a fim de aferir maior durabilidade.
- **Vidro solar:** no caso deste estudo assim como na maioria dos modelos de referência analisados, os painéis fotovoltaicos são cobertos por vidro temperado de espessura de 3,2mm. Porém, essa dimensão pode variar até 4mm. O vidro solar é um vidro temperado especial, ultrapuro e de baixo índice de ferro, revestido por substância antireflexiva, produzido visando a baixa refletância e a maior permeabilidade de luz (PORTAL SOLAR, 2019b).
- **Encapsulante:** o EVA é utilizado, principalmente, para unir os materiais (célula de silício, conectores, backsheet, vidro) por laminação (PORTAL SOLAR, 2019b).
- **Célula fotovoltaica:** composta principalmente por silício e conectores de prata (ribons e busbars) que podem ser impressos ou colados (PORTAL SOLAR, 2019b).
- **Backsheet (folha posterior):** é a camada base do painel. De modo geral, feita de material plástico a base de PET. Aryan, Font-Brucart e Maga (2018), apresentam algumas das possibilidades de composição desse material, como na Figura 13.

Figura 13 – Tipos comuns de configuração de backsheet.



Fonte: Aryan, Font-Brucart e Maga, 2018, p. 445.

- Caixa de junção: possui carcaça de plástico, contendo diodos de proteção (diodos bypass) e cabos para conexão das placas (FREIRE, 2017).
- Condutores: Usualmente, cada painel possui uma caixa de junção, e cada caixa de junção, um cabo conector de aproximadamente um metro de comprimento, composto por fio metálico revestido com material de base plástica (polietileno, por exemplo).
- Inversor solar: é um componente à parte do painel fotovoltaico e é o responsável pela conversão da energia de corrente contínua para corrente alternada. A empresa que produz e comercializa o inversor não é a mesma que produz o painel, fazendo dele um processo dissociado do painel fotovoltaico.
- Estrutura: a estrutura para instalação do sistema é comumente produzida por empresas terceirizadas e composta por perfis de alumínio extrudado e anodizado.

Atualmente, os sistemas instalados podem ser autônomos, que demandam a utilização de baterias, ou conectados à rede (ZHANG; WANG; YANG, 2018). No Brasil, os sistemas conectados à rede e comumente instalados em edificações urbanas como residências, são regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta, estabelece condições gerais para o acesso à micro (até 75 kW de potência instalada) e mini (entre 75kW e 3MW de potência instalada) geração de energia distribuída e sistemas de compensação, pela Resolução Normativa 482 de 2012 (ANEEL, 2012), e posteriormente pela Resolução Normativa 687 de 2015 (ANEEL, 2015), que vêm a retificar alguns pontos da anterior.

No Brasil, o usuário gerador de energia solar fotovoltaica, quando gerar mais energia do que consumir, pode repassar esse excedente a agência distribuidora de energia, ficando com crédito para os próximos sessenta meses. Outra alternativa é descontar o valor em outra unidade, desde que do mesmo proprietário (inscrita no mesmo CPF) e na mesma área de concessão (abastecida pela mesma agência) (ANEEL, 2015).

De acordo com publicações recentes (MAGDESIAN, 2020), em 2019, foi realizada uma consulta pública a fim de revisar algumas regras para micro e mini geração e energia distribuída. Assim, percebe-se que vêm sendo estudadas novas alternativas quanto às normas de compensação de energia, e por isso, pode-se esperar mudanças em um futuro próximo para as Resoluções Normativas aqui analisadas.

A Resolução 687 (ANEEL, 2015) atinge consumidores responsáveis por unidade consumidora e engloba situações de geração e compensação de energia distribuída, tais como: micro ou mini geração de energia distribuída; integrante de empreendimento de múltiplas unidades consumidoras; geração compartilhada; autoconsumo remoto. Como complemento a isso, orienta e especifica quais tipos de consumidores geradores se enquadram em cada uma das categorias.

Bezerra, Lira e Silva (2018) apresentam estudo brasileiro de um sistema fotovoltaico, limitando sua análise do “berço ao portão”. Para os autores, o sistema é benéfico e conta com resultados positivos, afinal, produzirá energia livre de emissões prejudiciais ao ecossistema por pelo menos 20 anos.

Rahman, Alam e Ahsan (2019) elaboraram uma ACV de sistema fotovoltaico para Bangladesh para a avaliação de impacto e também uma análise do tempo de *payback* referente a energia consumida para a produção do sistema. Para os autores, os módulos fotovoltaicos podem parecer totalmente “limpos”, ou sem causar qualquer impacto ambiental, porém o sistema emite gases de efeito estufa resultantes dos processos produtivos, transporte e gestão de resíduos, assim como dos demais componentes como por exemplo cabeamento e estruturas de suporte para montagem.

Oliveira, Trigo e Gasi (2018) desenvolveram estudo que aborda a eficiência energética do ciclo de vida de sistema fotovoltaico no contexto brasileiro, e defendem que a tecnologia fotovoltaica não está isenta de impactos ambientais. Os autores concluem que os sistemas analisados possuem boa eficiência graças à suficiente

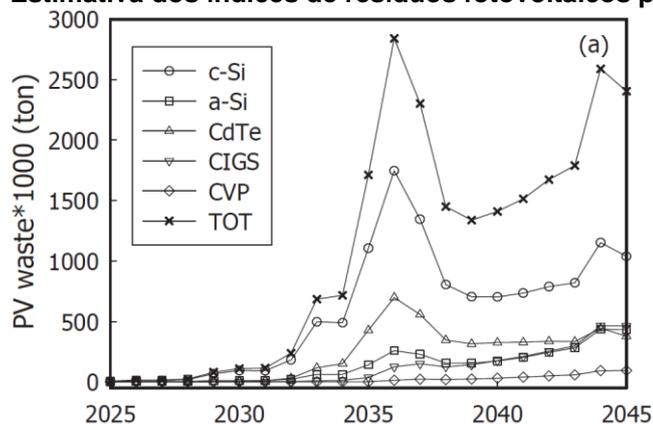
radiação solar no Brasil, porém a ineficiência energética da indústria nacional em comparação a países mais desenvolvidos, resulta em alto consumo de energia para a produção do sistema.

Constantino *et al.* (2018) elaboraram a ACV de sistema fotovoltaico Multi-Si instalado no nordeste do Brasil. Para os autores, a produção brasileira desse tipo de sistema, ou em outros países de fonte de energia predominantemente renovável como por exemplo Canadá, é mais atrativa, devido às emissões resultantes do consumo de energia altamente poluidora em países como a China, por exemplo. Como ratificam os autores, os impactos ambientais causados pela geração de energia dependem da intensidade de CO₂/MWh resultante da tecnologia e dos combustíveis utilizados nos processos. Por isso, considerando que os países possuem diferente disponibilidade de recursos, encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico, utilizando de diferentes técnicas e tecnologias, resultam em consideráveis variações da intensidade de emissões de carbono.

Como ratificam Constantino *et al.* (2018), os impactos ambientais causados pela geração de energia dependem da intensidade de CO₂/MWh resultante da tecnologia e dos combustíveis utilizados nos processos. Por isso, considerando que os países possuem diferente disponibilidade de recursos, encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico, utilizando de diferentes técnicas e tecnologias, resultam em consideráveis variações da intensidade de emissões de carbono.

Padoan, Altimari e Pagnanelli (2019) apresentam gráficos de variação no volume de módulos fotovoltaicos obsoletos ao longo das próximas três décadas para a Europa (FIGURA 14). Os autores consideraram o tempo de vida médio de painéis fotovoltaicos de 25 anos, o que resultou em uma previsão de um pico no número de painéis fotovoltaicos inutilizados entre os anos de 2036 e 2045. Ou seja, o volume de material obsoleto tem seu ápice em 2036, justificado pelo rápido crescimento do mercado fotovoltaico entre 2008 e 2011, influenciado diretamente pela implementação de políticas públicas de incentivo à utilização e energia fotovoltaica em alguns países europeus como Itália e Alemanha. Entretanto, existe uma queda abrupta nos anos seguintes, justificada pela interrupção progressiva de tais políticas. Contudo, o crescimento volta a ser positivo nos anos seguintes, devido ao progresso contínuo dos países que não tiveram a interferência de políticas públicas.

Figura 14 – Estimativa dos índices de resíduos fotovoltaicos para Europa.

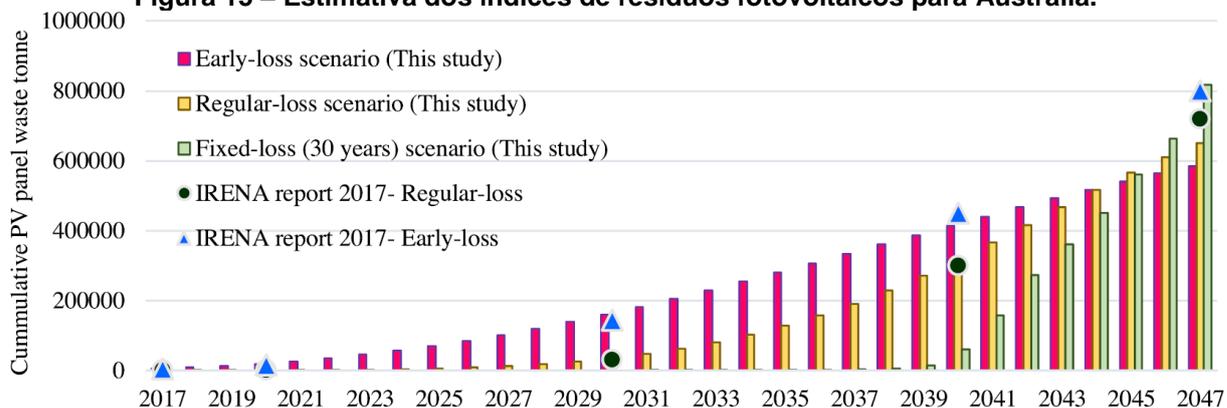


Fonte: Padoan, Altimari e Pagnanelli, 2019.

Segundo os autores, muitos países europeus já regulamentaram a reciclagem como estratégia de fim de vida dos painéis fotovoltaicos, e explicam que o descarte inadequado pode causar efeitos nocivos à saúde humana e à economia do setor de fabricação devido à dispersão de elementos tóxicos e ao desperdício de recursos materiais valiosos como alguns metais raros.

Outra pesquisa com aplicação à Austrália, também mostra resultados significativos. Mahmoudi, Huda e Behnia (2019) desenvolveram um estudo de previsão do volume de resíduos de painéis fotovoltaicos para as próximas décadas na Austrália assumindo diferentes cenários. O estudo é fundamentado por dados já publicados e em dois distintos períodos temporais, o primeiro de 2017 a 2047, e o segundo de 2048 a 2060. No gráfico (FIGURA 15) elaborado pelos autores, o volume de material obsoleto cresce sem apresentar queda até 2047.

Figura 15 – Estimativa dos índices de resíduos fotovoltaicos para Austrália.



Fonte: Mahmoudi, Huda e Behnia, 2019.

Por isso, para os autores, a gestão deste tipo de resíduo pode vir a ser um problema significativo na Austrália nas próximas décadas se não forem consideradas medidas preventivas. Os autores identificam que para superar esse desafio previsível em um futuro próximo, demanda-se uma estratégia bem coordenada e efetiva para a melhor gestão desse volume crescente de fotovoltaicos em fim de vida, viabilizada pela implementação de estratégias de economia circular, políticas públicas e regulamentações que dêem igual suporte, tanto à economia quanto ao meio ambiente.

Pode-se comparar os dados apresentados por Mahmoudi, Huda e Behnia (2019) e Padoan, Altimari e Pagnanelli (2019), promovendo análise de diferentes regiões do mundo. Primeiramente, nas análises de Padoan, Altimari e Pagnanelli (2019), já existe a Diretiva Europeia para a gestão de resíduos elétricos e eletrônicos, o que não existe como fundamentação para Mahmoudi, Huda e Behnia (2019), na análise australiana. Pode-se utilizar o ano de 2036 como comparativo entre ambas as análises. Para a Europa, 2036 é o ano de maior volume de resíduo fotovoltaico gerado, com aproximadamente 3.000.000 toneladas, e para a Austrália, 300.000, porém seguindo um aumento contínuo e proporcional.

Aproveita-se destes estudos aplicados em outros países, para uma prospecção de cenários futuros no Brasil e para justificar a relevância da busca por alternativas de gestão desses produtos em cenário de fim de vida, afinal, observa-se que o setor produtivo de painéis fotovoltaicos caminha para sua consolidação no mercado brasileiro. Sendo assim, a partir da discussão acerca das possibilidades dos sistemas fotovoltaicos como ciclo de vida, importação e descentralização da geração de energia, se faz necessário analisar as alternativas de fim de vida do sistema, partindo das normas de gestão de resíduos, discutidas na seção a seguir.

2.3 Gestão de resíduos

No Brasil, desde 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos orienta as mudanças implementadas para a gestão de resíduos nos municípios. Essa política considera aterros sanitários como situação ideal, permitindo a deposição de grandes volumes de material de modo controlado e impacto ambiental relativamente reduzido. Porém,

ainda pode-se considerar uma situação com espaço para melhorias, pois não engloba estratégias para a redução de consumo e não controla o desperdício de recursos. Considerando isso, muito ainda pode ser feito para o equilíbrio entre meio ambiente e cenários de “fim de vida” de produtos e materiais.

A ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) apresenta relatórios anuais referentes ao cenário da gestão de resíduos no Brasil. Segundo os últimos dados publicados (ABRELPE, 2017), foram geradas 78,4 milhões de toneladas de RSU (Resíduo Sólido Urbano) no Brasil, ou seja, 1,035kg por habitante por dia, dos quais, 71,6 milhões de toneladas, ou 91,2% foram coletados. Porém, destes, 59,1% foram destinados a aterros sanitários, ou seja, 40,9% dos resíduos coletados tiveram destino impróprio. Isso mostra que grande parte do RSU não é coletado, ou, ainda que seja coletado, não é destinado a aterros controlados.

No Brasil, dos 5570 municípios, 3923 apresentam alguma iniciativa de coleta seletiva (ABRELPE, 2017), o que pode ser considerado um cenário favorável, ao se levar em consideração o número de 3152 de 2009 (ABRELPE, 2010), anterior a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Lei nº 12.305 de 2010.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010 define como “destinação final ambientalmente adequada” situações de reutilização, reciclagem e compostagem e como “disposição final ambientalmente adequada” a distribuição ordenada de rejeitos em aterros atendendo às normas específicas (BRASIL, 2010). A fim de contextualizar algumas das situações mais corriqueiras no Brasil para a disposição final de resíduos, podem ser abordados os conceitos de aterro sanitário, aterro controlado e lixões, e os impactos ambientais que podem vir a causar.

No Brasil, os aterros sanitários se sobrepõem a uma camada inferior impermeável que evita a erosão, a contaminação do solo e do lençol freático e recolhem o chorume para que seja destinado à estação de tratamento. Aterros controlados não possuem essa camada inferior, são apenas cobertos por solo e grama, a fim de garantir a estabilidade e evitar a erosão. Já os lixões a céu aberto, são locais afastados dos centros urbanos, onde o resíduo é depositado e empilhado sem qualquer tratamento, o que o faz ser considerado o mais perigoso e agressivo ao meio ambiente entre esses três exemplos. Além de representarem grande risco a saúde pública, os lixões também podem causar

poluição do ar por emissão de metano e outros gases, contaminação do solo e do lençol freático, poluição das fontes de água, disseminação de doenças, deposição de resíduos perigosos, risco de incêndios e deslizamentos (MACHADO, 2013).

Segundo Gomes *et al.* (2015), os impactos ambientais mais graves causados por aterros são as emissões atmosféricas, por resultarem em prejuízos a qualidade do ar, efeito estufa, acidificação e depleção da camada de ozônio. Essas emissões são compostas principalmente por gás metano e dióxido de carbono, oriundos da deposição de resíduos e das emissões do transporte das etapas de coleta e deposição final, muitas vezes pouco otimizado. Segundo Machado (2013) toxicidade, lixiviação, poluição de oceanos e mortalidade de fauna, também são impactos ambientais que podem ser causados pelo acúmulo de grandes volumes de resíduos.

Vale destacar que o relatório da ABRELPE de 2017 ratifica o objetivo de erradicar os lixões no Brasil, e apresenta de modo específico os dados de cada região do país referentes a esta meta. Sendo assim, pode-se concluir que ainda que tais estratégias implementadas em larga escala no Brasil hoje, sejam parcialmente eficientes, a coleta dos resíduos, a remoção destes dos centros urbanos, e a sua destinação final pode ser considerada relativamente sustentável no quesito ambiental quando em cenários de aterros sanitários. Porém, observa-se, que ainda cabem melhorias ou mesmo a implementação de novas estratégias de gestão de resíduos. Convêm soluções que promovam a estagnação ou a redução desses ambientes insalubres, a economia de recursos naturais (água, energia, combustíveis), e como consequência disso, a mitigação dos impactos ambientais causados por esse cenário.

Deste modo, a duas seções a seguir, tratam especificamente da Diretiva Europeia 2012/19/UE em nível internacional, e das regulamentações vigentes em nível nacional. Em específico, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) e o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos (BRASIL, 2019a). Deste modo, evidencia-se que nesta seção tais documentos são discutidos e comparados levando em consideração suas diferentes abordagens. A PNRS aborda Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) e a Diretiva Europeia 2012/19 aborda resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de modo mais específico, ou seja, permita abordagem mais aprofundada do setor por inteiro, independente de acordos setoriais, assim como o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos.

2.3.1 Regulamentação Internacional: a Diretiva Europeia

A Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012), fundamenta-se no princípio da precaução e na otimização do fornecimento de recursos e apoia-se em outras diretivas que almejam o aproveitamento de matérias-primas livres de substâncias perigosas tanto à saúde quanto ao meio ambiente, buscando garantir processos produtivos menos agressivos e destinação final de menor impacto. Apresenta orientações a fim de complementar a legislação geral da União Europeia quanto a gestão de resíduos e orienta para “a redução do consumo desnecessário de recursos naturais e a prevenção da poluição” (p. 38). Assim, em princípio:

A presente diretiva estabelece medidas de proteção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactos adversos decorrentes da geração e gestão dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) e diminuindo os impactos gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização, [...]. (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 42)

A Diretiva estimula o projeto de produto que considere possíveis manutenção, atualização, reutilização, desmontagem e reciclagem de resíduos eletrônicos. Orienta para a visão holística do ciclo de vida e incentiva produtores a integrar materiais reciclados em novos produtos e equipamentos.

Considera a coleta seletiva como imprescindível para a reciclagem, destacando a importância da contribuição dos consumidores. Rege que os consumidores devem ser estimulados a retornar os produtos e que para isso são necessários pontos de coleta públicos e sem custo. Ressalta a importância de se seguir as normas de reciclagem de tratamento específico dos resíduos elétricos e eletrônicos a fim de evitar a dispersão de poluentes no material reciclado ou no ciclo dos resíduos. Deste modo, orienta que: “Dever-se-ão utilizar as melhores técnicas disponíveis de tratamento, valorização e reciclagem, desde que assegurem a proteção da saúde humana e uma elevada proteção do ambiente” (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 40).

Referente a essa regulamentação, destaca-se a atribuição de responsabilidade do fim de vida dos produtos aos seus fabricantes. Responsabiliza o produtor, mas também tira proveito do princípio do poluidor-pagador para estimular a transferência dos custos de coleta e tratamento ao consumidor. As disposições se aplicam a produtos e produtores independentemente do modo de venda, e demonstra-se atualizada ao incluir modalidades de venda *online* (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Cada produtor é responsável pelo financiamento da gestão dos resíduos provenientes dos próprios produtos, podendo cumprir com tal obrigação individualmente ou em sistema coletivo. Os sistemas de financiamento coletivo de produtores deverão se responsabilizar por “resíduos históricos”, ou seja, resíduos em circulação anterior à normativa. Assim, a responsabilidade repartida por todos produtores existentes.

Nos primeiros quatro anexos, apresenta especificamente quais categorias de materiais e produtos engloba. Além disso, apresenta um símbolo para marcação dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), orientando que não devem ser destinados juntamente com o resíduo comum, e demonstrando a importância de passar a informação ao consumidor ou usuário final para que sejam efetivadas as ações de implementação. Trata ainda da explicação dos conceitos empregados; estratégias de coleta seletiva e incentivo que esta demanda; taxaço da coleta seletiva; especificações de tratamento adequado; deslocamento dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) para tratamento; registro, informações e apresentação de relatórios; controle e inspeções (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Além disso, a diretiva específica alguns dos componentes que não engloba. O texto exclui, por exemplo, as “lâmpadas de incandescência”, “as armas, as munições e o material de guerra destinados a fins especificamente militares” (p.42), assim como, também identifica alguns componentes que incorpora. Dá destaque a elementos como equipamentos de iluminação e painéis fotovoltaicos como exemplos incluídos nos REEE. Em seu item 23, a Diretiva (2012) esclarece:

(23) No caso de produtos com um ciclo de vida longo e que agora são abrangidos pela presente diretiva, como, por exemplo, os painéis fotovoltaicos, dever-se-á utilizar da melhor forma possível os sistemas de recolha e de valorização existentes desde que estes preencham os

requisitos previstos na presente diretiva. (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 41)

A partir da discussão acerca da Diretiva Europeia, pode-se conhecer com maior clareza, os possíveis caminhos para a gestão de resíduos brasileira, em específico, resíduos de painéis fotovoltaicos como no caso desta pesquisa. Considerando o avanço do setor de energia solar no Brasil, é imprescindível o desenvolvimento de regulamentações ao exemplo desta. Afinal, ainda que já implementada, a própria Diretiva Europeia confirma que muito do resíduo ainda não encontra a correta destinação, o que ratifica a demanda de tempo para a consolidação efetiva das ações.

2.3.2 Regulamentação Nacional

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) fundamenta-se em conceitos de ciclo de vida, logística reversa, responsabilidade compartilhada, desenvolvimento sustentável e princípios de prevenção e precaução. Têm como diretriz “a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos” e como um de seus objetivos a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

A Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), determina que o Plano Nacional de Resíduos Sólidos deve ser atualizado a cada quatro anos com metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final dos resíduos sólidos, para a eliminação e recuperação dos lixões e para redução, reutilização e reciclagem. Proíbe o lançamento de resíduos a céu aberto ou sua queima, vetando os “lixões”. E por fim, determina o prazo de quatro anos a contar da data de publicação da mesma para a implementação de disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Para esta pesquisa, alguns artigos da Lei nº 12.305 (2010) são considerados mais relevantes e são discutidos a seguir.

O Artigo 30 institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, dirigindo-se a fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, titulares de serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

O Artigo 32 determina que “embalagens devem ser fabricadas com materiais que propiciem a reutilização ou a reciclagem” e que “cabe aos respectivos responsáveis assegurar que as embalagens sejam [...] recicladas, se a reutilização não for possível” (BRASIL, 2010). Contudo, tais determinações não garantem que os materiais sejam efetivamente reciclados posteriormente ao uso pelo consumidor e deixam em aberto qual dos agentes deve ser o encarregado, permitindo diferentes interpretações quanto a responsabilidade pelos rejeitos.

O Artigo 33 merece destaque ao atribuir a responsabilidade aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de estruturar e implementar sistemas de logística reversa mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor de forma independente ao serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Este tópico restringe a responsabilidade a produtos como agrotóxicos, pilhas, baterias, pneus, óleos lubrificantes e seus resíduos e embalagens, lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio de luz mista, produtos eletrônicos e seus componentes.

Além disso, este mesmo Artigo 33 ainda confirma a responsabilidade de devolução do consumidor e a responsabilidade de destinação ambientalmente correta dos importadores e fabricantes. O Artigo ainda complementa que todos os participantes do sistema de logística reversa, exceto os consumidores, devem manter atualizadas e disponíveis aos órgãos municipais e outras autoridades, as informações completas da realização das ações de sua responsabilidade.

Em 31 de outubro de 2019 foi assinado o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos (BRASIL, 2019a) que orienta para a responsabilidade da gestão de resíduos eletrônicos no Brasil e estabelece termos e condições para a implementação e operacionalização do Sistema de Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico. Os objetivos do acordo são a criação e a estruturação do Sistema de Logística Reversa para a destinação final ambientalmente adequada de Produtos Eletroeletrônicos.

Para isso, determina como obrigatoriedade, a fabricantes, distribuidores e comerciantes de Produtos Eletroeletrônicos, “implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor” (BRASIL, 2019a, p. 2). Atribui a comerciantes, distribuidores, fabricantes e importadores a

responsabilidade de disponibilizar os relatórios de suas ações aos órgãos integrantes do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente). Destaca-se, que tais orientações, independem da adesão formal das empresas, justamente por ser um acordo setorial.

Neste Acordo, são definidos como Produtos Eletroeletrônicos “equipamentos de uso doméstico cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas com tensão nominal não superior a 240 (duzentos e quarenta) volts” (BRASIL, 2019a, p. 5). Ao tratar de “equipamentos de uso doméstico”, especifica sua abordagem a produtos de “uso próprio ou pessoal, residencial e/ou familiar, exclusivamente por pessoa física de produtos eletrônicos” (BRASIL, 2019a, p. 5). No caso desta pesquisa, vale destacar que o Acordo já identifica e inclui o produto “painel fotovoltaico” em seu Anexo V.

A implementação do sistema é organizada em duas fases. A primeira que se caracteriza principalmente pela adesão dos fabricantes, importadores, Unidades Gestoras, comerciantes e distribuidores, e pela instituição de mecanismos financeiros e de monitoramento do sistema, com data para se encerrar em 31 de dezembro de 2020. E a segunda fase, com data de início para 1º de janeiro de 2021, que engloba a habilitação das prestadoras de serviço, a elaboração de um plano de educação ambiental, e a instalação dos pontos de Recebimento e/ou Consolidação.

O Acordo define que o gerenciamento dos produtos eletroeletrônicos descartados para atender ao Sistema de Logística Reversa, deve atender às seguintes etapas:

- I. Descarte, pelos consumidores, dos produtos eletroeletrônicos nos pontos de recebimento;
- II. Recebimento e armazenamento temporário dos produtos eletroeletrônicos descartados em pontos de recebimento ou dos recebidos em pontos de consolidação, conforme o caso;
- III. Transporte dos produtos eletroeletrônicos dos pontos de recebimento ou dos pontos de consolidação até a destinação final ambientalmente adequada. Alternativamente, transporte dos produtos eletroeletrônicos descartados dos pontos de recebimento até os pontos de consolidação e, em seguida, até a destinação final ambientalmente adequada; e
- IV. Destinação final ambientalmente adequada. (BRASIL, 2019a, p. 9)

Quanto a questões econômicas, são abordadas orientações quanto a recursos financeiros, custos, despesas, Financiamento do Sistema, e a divulgação e tais informações. Além disso, o Acordo especifica que:

Não haverá qualquer remuneração, ressarcimento ou pagamento para que os Consumidores efetuem a entrega dos Produtos

Eletroeletrônicos ao Sistema de Logística Reversa de que trata este Acordo Setorial, a menos que mecanismos de incentivo sejam adotados por único e exclusivo critério da(s) Empresa(s) ou da(s) Entidade(s) Gestora(s). (BRASIL, 2019a, p. 9)

Além dos fabricantes, distribuidores e comerciantes, o Acordo também apresenta atores como consumidores, importadores, Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP), Entidades Gestoras, recicladores e consumidores. O GAP seria um grupo criado pelas empresas a fim de acompanhar a implementação e operacionalização do Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. As Entidades Gestoras, se tratam de pessoas jurídicas constituídas pelas Empresas ou Associações de fabricantes e importadores dos produtos, responsáveis pela execução das ações do Sistema de Logística Reversa, assim, como pela divulgação dos resultados de tais ações a fim de demonstrar o cumprimento das metas.

O Acordo permite a participação de recicladores, autoriza e incentiva a participação das cooperativas e associações de catadores desde que legalmente constituídas. Deste modo, determina que só farão parte do Sistema de Logística Reversa se licenciados pelos órgãos ambientais competentes e após habilitação pelas Empresas ou Entidades Gestoras, assim como, devem atender às ABNT NBR 16156 de 2013 e ABNT NBR 15833 de 2018. Deste modo, em suas disposições Gerais, destaca:

24.11 Os fabricantes, importadores e comerciantes de Produtos Eletroeletrônicos são os responsáveis, de fato, pela implantação setorial de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, bem como por todas as demais obrigações acessórias relativas à prestação de contas, organização de dados e informações junto à quaisquer órgãos ambientais. (BRASIL, 2019a, p.29 e 30)

Especifica-se alguns deveres dos atores que compõem o sistema:

- Fabricantes e importadores: Destinação Final Ambientalmente Adequada de todos os produtos recebidos;
- Distribuidores: disponibilizar ou custear os pontos de consolidação do sistema;
- Comerciantes: informar os consumidores acerca de suas responsabilidades, receber e armazenar temporariamente os produtos descartados pelos consumidores, assim como as embalagens destes produtos. Destaca-se que as Empresas prestadores de telefonia móvel que comercializam produtos englobados pelo Acordo, possuem as mesmas responsabilidades dos comerciantes.

- Consumidores: responsáveis pela integridade física do produto a fim de evitar riscos à saúde humana ou danos ao meio ambiente; apagar informações pessoais no caso de dispositivos de armazenamento de dados; descartar os produtos adequadamente, desligados, nos pontos de coleta específicos. Vale a ressalva de que as empresas são isentas de qualquer responsabilidade quanto a devolução ou recuperação de dados antes armazenados nos dispositivos descartados.
- Titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: são isentos de responsabilidades com as ações exceto quando em caráter voluntário.

O Acordo também possui intenção educacional, abordando um plano de comunicação e educação ambiental não formal com o objetivo de informar principalmente consumidores quanto às orientações para a ação de descarte. Para isso, também especifica os diferentes meios de comunicação possíveis de serem utilizados, como por exemplo, mídia digital e redes sociais, entre outros.

São abordados o monitoramento e a avaliação de possíveis impactos socioambientais do sistema, assim como prazos para a divulgação dos relatórios anuais, além de determinar moldes e periodicidade de auditorias orientadas pelo GAP. O Acordo determina alguns requisitos básicos para a implementação do Sistema, como prazos e quantidade de pontos de coleta por exemplo. Para isso, enfatiza que:

16.8 O atendimento às metas do Sistema de Logística Reversa dependerá da efetiva participação de todos os atores do ciclo de vida dos Produtos Eletroeletrônicos objeto deste Acordo Setorial, observados os limites de suas atribuições individualizadas e encadeadas. (BRASIL, 2019a, p.24)

Por fim, o Acordo busca garantir igualdade entre atores do sistema quanto ao cumprimento de suas obrigações, discute penalidades, e confirma que deve entrar em vigor a partir da data de publicação de seu extrato no Diário Oficial da União e por prazo indeterminado.

Como destaca a ABRELPE (2017), o cidadão tem papel fundamental para o sucesso da implementação das ações de logística reversa. Por isso, se os consumidores não possuem informações suficientes quanto às alternativas, existem grandes chances de os resíduos não serem destinados corretamente.

Deste modo, encontra-se nos dados fornecidos pela ABRELPE (2017) e na Política de Gestão de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), informações suficientes para um

panorama geral do cenário da gestão de resíduos no Brasil. A partir do recente Acordo Setorial de Eletroeletrônicos, espera-se maior divulgação de informações para a população e assim, melhorias quanto a gestão dessa tipologia de resíduos.

2.4 O método de Avaliação do Ciclo de Vida

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua NBR ISO 14040 (2014) define o termo “Avaliação de Ciclo de Vida” como uma compilação e avaliação de entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema ao longo de seu ciclo de vida. A norma apresenta orientações quanto a elaboração desta análise, e segundo esta, ACV pode tratar de aspectos do ciclo de vida do produto como a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final, e ao englobar todas estas etapas, denomina-se do “berço ao túmulo”. Sendo o “berço” as fases iniciais como a obtenção da matéria-prima, e o “túmulo” as fases finais, como o descarte ou tratamento de reciclagem.

A elaboração da ACV engloba quatro etapas básicas (ABNT, 2014):

- 1) definição de objetivo e escopo;
- 2) análise do inventário;
- 3) avaliação de impactos;
- 4) interpretação.

Além destas, a norma ainda engloba em seu escopo: a comunicação e a análise crítica da ACV, suas limitações, relação entre etapas, e as condições para uso de escolhas de valores e elementos opcionais. Em adição a isso, são identificadas as diferenças entre estudos de ACV e ICV (inventário do ciclo de vida), sendo que o primeiro engloba as quatro fases básicas, e o segundo exclui a fase de avaliação de impactos.

A norma também justifica possíveis limitações do estudo:

- 4.3 i) a ACV enfoca impactos ambientais potenciais; a ACV não prevê impactos ambientais absolutos ou precisos devido:
 - à expressão dos impactos ambientais potenciais relativamente a uma unidade de referência,
 - à integração de dados ambientais nas dimensões espaço e tempo,
 - à incerteza inerente na modelagem de impactos ambientais, e

- ao fato de que alguns impactos ambientais possíveis são claramente impactos futuros; (ABNT, 2014, p.9)

Neste estudo, serão seguidas as orientações da ABNT NBR 14040 (2014), quanto às etapas que o sistema pode englobar:

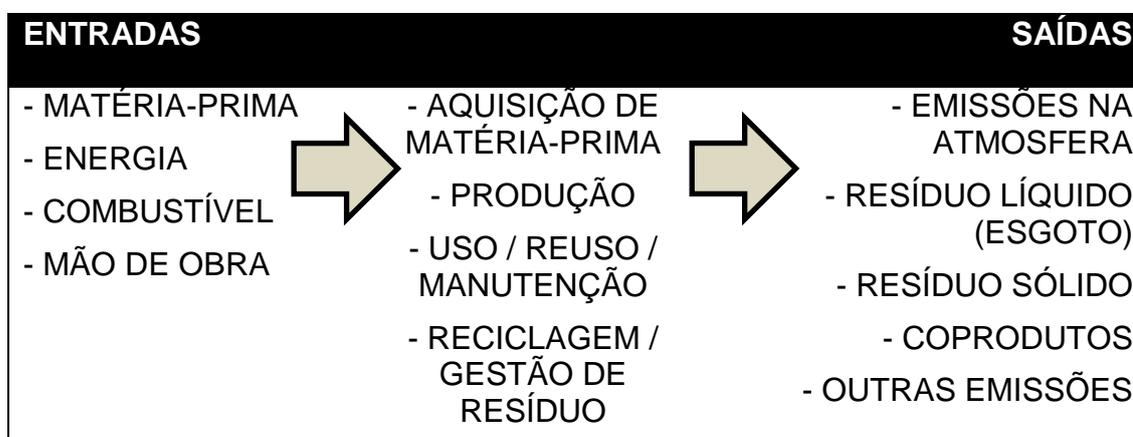
Ao se estabelecer a fronteira do sistema, convém que diversos estágios do ciclo de vida, processos elementares e fluxos sejam levados em consideração, tais como:

- aquisição de matérias-primas;
- entradas e saídas na cadeia principal de manufatura/processamento;
- distribuição/transporte;
- produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- uso e manutenção de produtos;
- disposição final de resíduos de processos e de produtos;
- recuperação de produtos usados (incluindo reuso, reciclagem e recuperação de energia);
- manufatura de materiais auxiliares;
- manufatura, manutenção e descomissionamento de equipamentos;
- operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

Em muitas situações, a fronteira do sistema definida inicialmente terá que ser refinada posteriormente. (ABNT, 2014, p.13-14)

As entradas e saídas (*inputs* e *outputs*) de uma ACV, dependem especificamente dos objetivos de cada estudo. Por exemplo, mão de obra, matéria-prima, água e energia, são alguns tipos de entradas. Emissões atmosféricas, resíduos líquidos e sólidos, coprodutos, ou outras emissões, podem ser exemplos de saídas. Nunberg e Eckleman (2017), apresentam um esquema genérico que ilustra claramente tais etapas básicas dos limites de uma ACV. Essa explicação pode ser ilustrada conforme Figura 16.

Figura 16 - Limites do sistema de ACV.



Fonte: Compilação da autora com referência em Nunberg e Eckleman, 2017.

Vale destacar que não existe produto ou sistema que não gere impacto: tudo causa impacto ambiental de alguma maneira. A ACV de determinado produto, também envolve examinar a produção dos elementos mais específicos. Considera-se que toda manufatura usa ou produz energia, o que significa que todo material industrializado ou produto incorpora energia. Por isso, para equilibrar energia, emissões e fluxos de água, é necessário examinar recursos, materiais, produtos e sistemas, incluindo suas vidas úteis, para um projeto mais sustentável e integrado (KEELER; BURKE, 2010).

Para a análise de dados coletados, são discutidas as incertezas relacionadas aos dados coletados para a elaboração da ACV. Um dos primeiros a tratar sobre incertezas em ACV, foi Huijbregts (1998), e pode ser utilizado como fonte de referência para a análises ainda hoje, como mostra Guimarães (2018). Huijbregts (1998) determinou três tipos de incertezas e três tipos de variabilidades para análise de ACV:

- Incerteza de Parâmetro: causada por dados completamente desconhecidos;
- Incerteza de Modelo: simplificações causadas pela dificuldade de modelagem;
- Incertezas de Cenário: são incertezas causadas por escolhas como unidade funcional, alocação, limites do sistema, horizonte temporal e nível tecnológico.
- Variabilidade Espacial: propriedades físico-químicas e ecológicas do ambiente, concentração de substâncias químicas ou densidade populacional dependente de corretas escolhas quanto a sub-regiões do sistema;
- Variabilidade Temporal: depende da atualidade e amplitude dos dados utilizados;
- Variabilidade entre fontes e objetos: diferenças entre especificações das referências utilizadas e os processos em cenário real.

Deste modo, tais critérios podem fundamentar uma análise qualitativa mais detalhada quanto aos dados que compõem a ACV.

Geralmente, utilizam-se *softwares* para os cálculos quantitativos da ACV, que, além de permitirem a organização e a visualização gráfica do sistema, são abastecidos com bases de dados e diferentes métodos de cálculos. As bases de dados suprem o *software* conforme o sistema a ser analisado e fornecem dados referentes às entradas e saídas de cada processo, como por exemplo materiais e componentes químicos.

Comumente, as licenças para *softwares* são pagas, assim como cada uma das bases de dados utilizadas. Entretanto, atualmente, existem raros *softwares* de livre acesso,

como o OpenLCA, que permite acesso gratuito e disponibiliza algumas bases de dados e métodos de cálculo também gratuitos.

A Figura 17 a seguir, exemplifica a composição de dados de entradas e saídas de um processo (produção do vidro solar) de referência desta pesquisa, fornecido pela base de dados educacional da Ecoinvent, no *Software* OpenLCA.

Figura 17 – Representação das entradas e saídas da base de dados da Ecoinvent no OpenLCA para o processo de produção do vidro solar, como exemplo.

Inputs/Outputs: solar glass production, low-iron | solar glass, low-iron | Cutoff, S

Inputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
Aluminium, in ground	Resource/in ground	0.00037	kg		none
Anhydrite, in ground	Resource/in ground	2.77180E-9	kg		none
Antimony, in ground	Resource/in ground	4.43566E-10	kg		none
Argon-40	Resource/in air	6.35797E-5	kg		none
Barium, in ground	Resource/in ground	0.00047	kg		none
Basalt, in ground	Resource/in ground	0.00017	kg		none
Borax, in ground	Resource/in ground	1.36914E-7	kg		none
Bromine, in water	Resource/in water	1.21557E-8	kg		none
Cadmium, in ground	Resource/in ground	1.08009E-7	kg		none
Calcite, in ground	Resource/in ground	0.49949	kg		none
Calcium, in ground	Resource/in ground	0.00011	kg		none
Carbon dioxide, in air	Resource/in air	0.02527	kg		none
Carbon, organic, in soil or biomass stock	Resource/in ground	6.00659E-6	kg		none
Carmallite	Resource/in water	1.17297E-7	kg		none
Cerium, in ground	Resource/in ground	2.41583E-8	kg		none
Chromium, in ground	Resource/in ground	0.00014	kg		none
Chrysotile, in ground	Resource/in ground	6.52394E-7	kg		none
Clav. bentonite. in ground	Resource/in ground	7.39074E-5	ka		none

Outputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
1,3-Dioxolan-2-one	Emission to water/unspecified	5.04431E-9	kg		none
1,4-Butanediol	Emission to air/high population...	2.62272E-12	kg		none
1,4-Butanediol	Emission to water/surface water	6.03225E-12	kg		none
1-Pentanol	Emission to air/high population...	4.23157E-13	kg		none
1-Pentanol	Emission to water/surface water	1.01559E-12	kg		none
1-Pentene	Emission to air/high population...	7.30416E-12	kg		none
1-Pentene	Emission to water/surface water	7.67465E-13	kg		none
2,2,4-Trimethyl pentane	Emission to air/unspecified	5.19781E-14	kg		none
2,4-D	Emission to air/low population ...	1.22520E-11	kg		none
2,4-D	Emission to soil/agricultural	8.24525E-10	kg		none
2,4-D amines	Emission to air/low population ...	2.74263E-20	kg		none
2,4-D amines	Emission to soil/agricultural	4.62144E-18	kg		none
2,4-D amines	Emission to water/ground water	1.43725E-19	kg		none
2,4-D amines	Emission to water/surface water	5.90334E-22	kg		none
2,4-D ester	Emission to air/low population ...	3.14799E-20	kg		none
2,4-D ester	Emission to soil/agricultural	4.31697E-18	kg		none
2,4-D ester	Emission to water/ground water	1.33844E-19	kg		none
2,4-D ester	Emission to water/surface water	5.49393E-22	ka		none

Fonte: imagem do *Software* OpenLCA, 2020.

Geralmente, os métodos de cálculo são segregados em duas categorias: *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). Ao se abrir métodos de cálculo de mesma referência no *software* OpenLCA, porém com a diferença de serem um *midpoint* e o outro *endpoint*, percebe-se a variação entre unidades de referência (*Reference Units*) e quantidades de categorias de impacto. Os *endpoints* são organizados em categorias mais abrangentes (como qualidade do ecossistema, saúde humana e recursos), e os *midpoints* em categorias específicas (como depleção fóssil, hídrica, de metais, ecotoxicidade terrestres, de água doce e salgada, eutrofização de água doce e salgada, acidificação terrestre, etc.). Ou seja, os *endpoints* podem ser a representação de conjuntos de resultados, como “macrocategorias”, e os *midpoints*, podem ser as “microcategorias”.

Segundo Mendes, Bueno e Ometto (2016), *midpoint* tira proveito de indicadores localizados ao longo de um mecanismo ambiental e *endpoint* considera o mecanismo ambiental por completo, incluindo o ponto final. A NBR 14040 elucida quanto aos conceitos de mecanismo ambiental e ponto final. O mecanismo ambiental é o “sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto, vinculando os resultados da análise do inventário do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais da categoria”, e o ponto final da categoria, é o “atributo ou aspecto do ambiente natural, saúde humana ou recursos que identifica uma questão ambiental merecedora de atenção” (ABNT, 2014, p.5).

Para esta pesquisa, buscou-se o método de cálculo mais recente disponível e de acesso livre. Assim, encontrou-se o ILCD 2.0 2018 *midpoint*, acessível pelo site da OpenLCA. O método organiza as 19 categorias de impacto em quatro macrocategorias, e apresenta as unidades de referência, conforme a Tabela 1.

A fim de facilitar a compreensão da análise dos impactos ambientais, fundamenta-se na Ontologia Terminológica do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2015), para elucidar alguns conceitos relevantes (TABELA 1):

- Ecotoxicidade: “resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos na biosfera, provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, conseqüentemente, potenciais danos ao ecossistema. ” (IBICT, 2015, p.19)
- Eutrofização: “resultante do aumento da concentração de nutrientes na água ou no

solo provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, conseqüentemente, potencial aumento do número de espécies no ecossistema. ” (IBICT, 2015, p.23)

- Mudanças Climáticas:

Categoria de impacto resultante do aumento da capacidade de retenção de radiação infravermelha na estratosfera, gerada pelo aumento da concentração de determinados gases provenientes de emissões atmosféricas, provocando, conseqüentemente, potencial aumento da temperatura global (medida em relação ao efeito de 1 kg de CO₂). (IBICT, 2015, p.32)

Tabela 1 – Categorias e Subcategorias de Impacto do modelo de cálculo ILCD 2.0 2018.

Macro categoria	Categoria	Unidade de Referência
Mudanças Climáticas	Mudanças Climáticas Biogênicas	kg CO ₂ -Eq
	Mudanças Climáticas Fósseis	kg CO ₂ -Eq
	Mudanças Climáticas de Uso do Solo e de Mudanças no Uso do Solo	kg CO ₂ -Eq
	Mudanças Climáticas Totais	kg CO ₂ -Eq
Qualidade do Ecossistema	Acidificação Terrestre e de Água Doce	mol H ⁺ -Eq
	Ecotoxicidade de Água Doce	CTU
	Eutrofização de Água Doce	kg P-Eq
	Eutrofização Marinha	kg N-Eq
	Eutrofização Terrestre	mol N-Eq
Saúde Humana	Agentes Cancerígenos	CTUh
	Radiação Ionizante	kg U235-Eq
	Agentes não-cancerígenos	CTUh
	Depleção da camada de Ozônio	kg CFC-11-Eq
	Criação de Ozônio Fotoquímico	kg NMVOC-Eq
	Substâncias Inorgânicas Respiratórias	Incidência de doenças
Recursos	Desperdício de água	m ³ water-Eq
	Fósseis	MJ
	Uso do Solo	Pontos
	Metais e Mineirais	kg Sb-Eq

Fonte: organizado pela autora a partir do método de cálculo Ecoinvent 2.0 2018 no OpenLCA.

A partir destas categorias de impacto, é possível elaborar a análise final e desenvolver a interpretação dos resultados. Deste modo, como resultado da ACV, pode-se identificar quais etapas do ciclo de vida e categorias de impacto são mais agressivas, e assim, propor soluções alternativa de mitigação desses impactos ambientais.

2.5 Estudos acerca dos impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos

Além das referências já citadas como fundamentação e justificativa, foi elaborada uma revisão bibliográfica que almeja um panorama geral de estudos recentes acerca do tema. Nesta seção, são apresentadas algumas produções recentes da área.

O levantamento por artigos publicados, fundamenta-se por busca avançada no Portal de Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), onde foi delimitado o período de 01/01/2018 a 31/12/2019 com termos em inglês, e ampliado para os últimos 10 anos utilizando os termos em português. Sempre filtrando publicações revisados por pares, considerou-se que tal volume de estudos seria suficiente para a fundamentação da pesquisa, principalmente devido ao caráter atual do tema e o ágil avanço tecnológico em ambos os setores de energia solar e avaliação e ciclo de vida.

O primeiro levantamento de textos partiu de busca avançada utilizando dos termos “*photovoltaic*” (fotovoltaico) e “*life cycle assessment*” (avaliação de ciclo de vida) no título. Algumas publicações utilizam do termo “*life cycle assessment*” (LCA), ou avaliação de ciclo de vida (ACV) para a abordagem de custo do sistema, não tratando do impacto ambiental, o que as permitiria utilizar do termo *life cycle cost* (LCC) no caso, custo do ciclo de vida (CCV), comumente empregado para este tipo de análise. Nos casos de fuga do tema, os artigos não foram incluídos nessa pesquisa. A partir dos mesmo pré-requisitos, o segundo levantamento partiu dos termos “*photovoltaic*” e “*recycling*” (reciclagem) no título. Em ambos os levantamentos, textos apresentados como resultado pelo Portal, porém de acesso limitado ou pago, foram excluídos.

A mesma busca foi realizada utilizando dos termos em português a fim de obter-se um panorama das produções nacionais. Porém, devido ao reduzido número de estudos brasileiros encontrados, a pesquisa em nível nacional foi ampliada para os últimos 10 anos. Além disso, também foram pesquisados Anais de eventos nacionais recentes, como o VII Congresso Brasileiro de Energia Solar de 2018, no qual foram encontrados dois trabalhos, e o VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, também de 2018, em que também foram encontrados dois trabalhos.

Considerando o caráter específico de cada ACV, a maioria dos estudos foram considerados relevantes para a pesquisa, ainda que utilizem de dados regionais específicos e abordem a situação de cada país. As publicações que englobam estudos de caso de aplicações práticas de ferramentas de ACV, foram organizadas na Tabela 2, apresentada ao final desta seção, promovendo a análise do panorama geral.

A pesquisa por estudos brasileiros também foi realizada por meio da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, onde foram encontrados alguns estudos recentes que abordam a gestão de resíduos fotovoltaico. Estes estudos foram utilizados como referência no trabalho, porém não foram incluídos na tabela de Revisão bibliográfica por não apresentarem estudos de caso específicos fazendo uso de *softwares* de ACV.

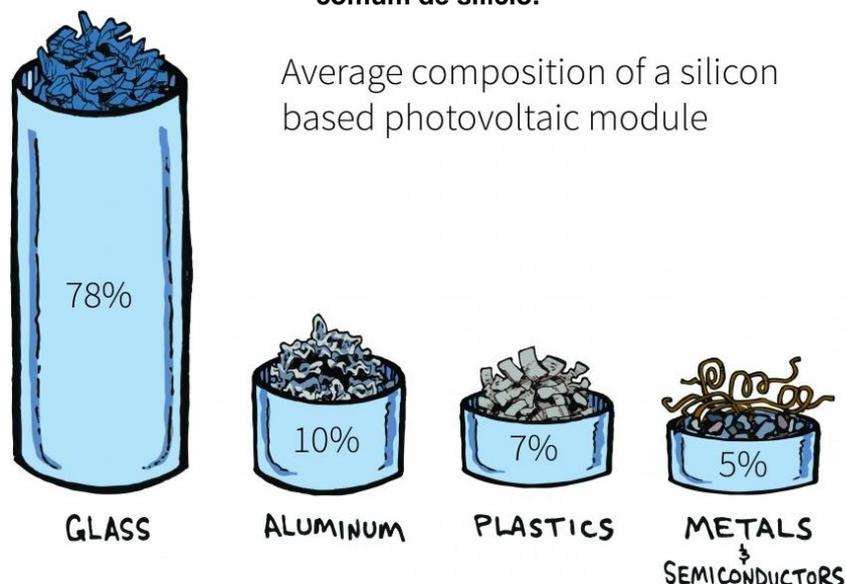
Como demonstraram Zhang, Wang e Yang (2018), os resultados de diferentes pesquisas variam muito devido a inúmeros fatores, como a localização, insolação, inclinação da instalação, condições climáticas. Sendo assim, vale destacar que a elaboração de uma ACV depende especificamente da localização, percursos e transporte de materiais de cada caso. Desta forma, ainda que existam estudos similares quanto ao impacto ambiental de painéis fotovoltaicos, cada análise possui diferentes especificações e principalmente, diferentes limites de inventário.

2.5.1 Estudos de ACV de painéis fotovoltaicos

Dentre as inúmeras estratégias de sustentabilidade da atualidade, a instalação de sistemas para a geração de energia distribuída vem se propagando. Entretanto, se faz necessário avaliar tais sistemas a fim de se obter resultados quantitativos de impacto ambiental que permitam comparações entre alternativas. Por isso, elaborar a ACV específica para cada situação e localidade, pode ser considerada uma linha de pesquisa em desenvolvimento que traz à discussão impactos ambientais de produção, instalação, uso e fim de vida desses sistemas. Como confirmam Li, Roskilly e Wang (2018), a ACV tornou-se uma poderosa ferramenta para investigações científicas na última década e pode ser considerada o principal método para traduzir a ciência da sustentabilidade em conhecimento útil para dar suporte a tomada de decisões comerciais e regulatórias.

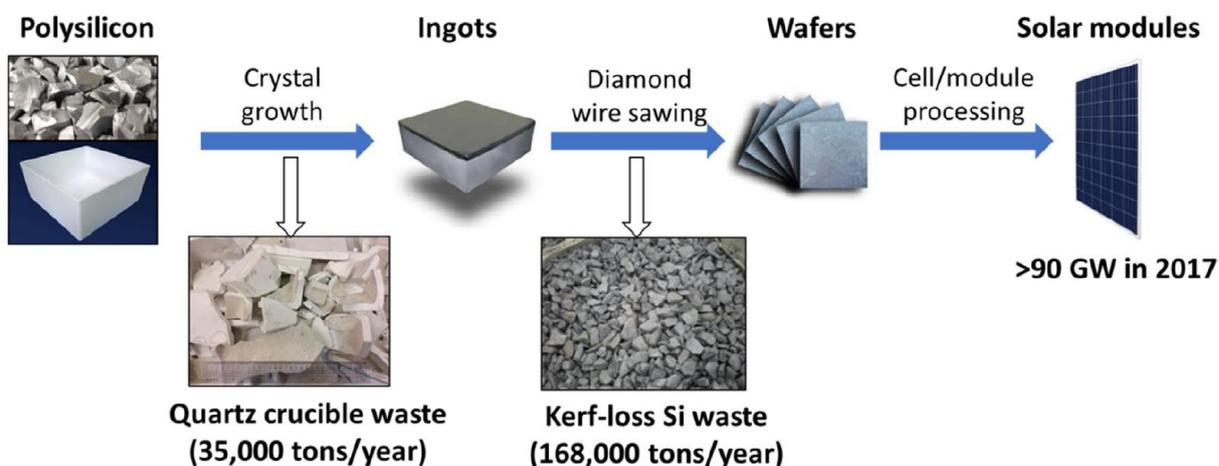
De acordo com a PV Cycle (2016), um modelo comum de módulo fotovoltaico de silício é composto por 78% de vidro, 10% de alumínio, 7% de plásticos e 5% são metais e semicondutores, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Representação da média de materiais que compõem um módulo fotovoltaico comum de silício.



Yang *et al.* (2019) apresentam alguns dos processos de transformação do silício em célula fotovoltaica e dos resíduos gerados por estes, conforme a Figura 19 a seguir.

Figura 19 – Esquema representativo da cadeia produtiva da indústria fotovoltaica.



Fonte: Yang *et al.*, 2019.

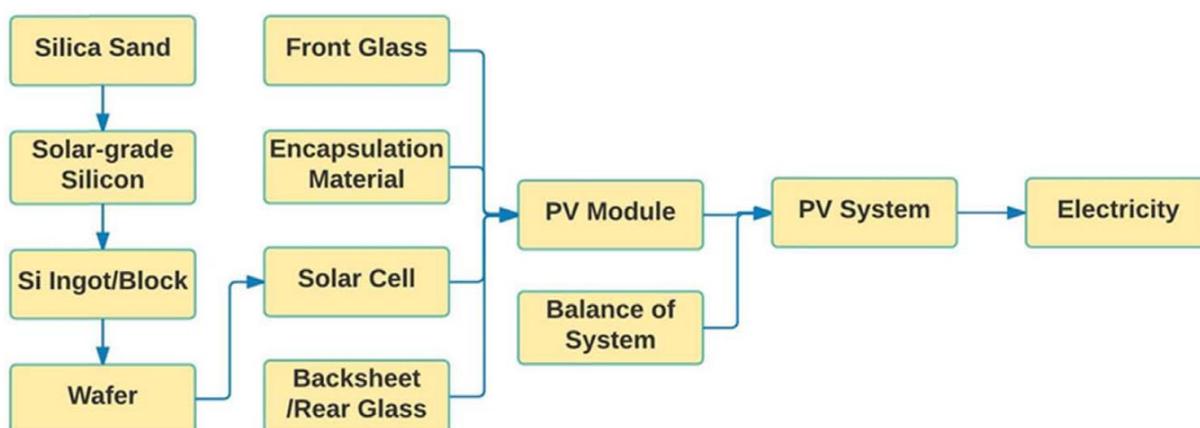
Xu *et al.* (2018) e Luo *et al.* (2018, p.159) apresentam esquemas bastante ilustrativos do ciclo de vida do silício para a produção do painel fotovoltaico, como representado pelas Figuras 20 e 21 a seguir, respectivamente.

Figura 20 – Ilustração do ciclo de vida do silício para painel fotovoltaico.



Fonte: Xu *et al.*, 2018, p. 312.

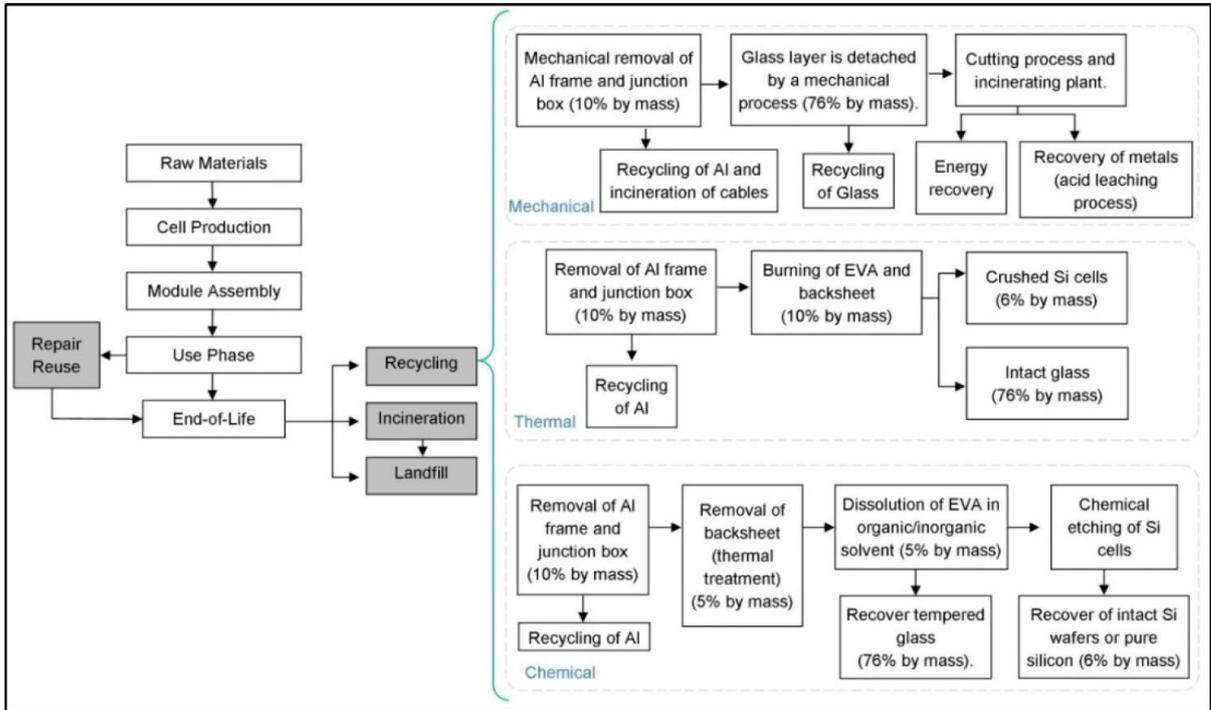
Figura 21 – Exemplo de fluxos da geração de energia por sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Luo *et al.*, 2018, p.159.

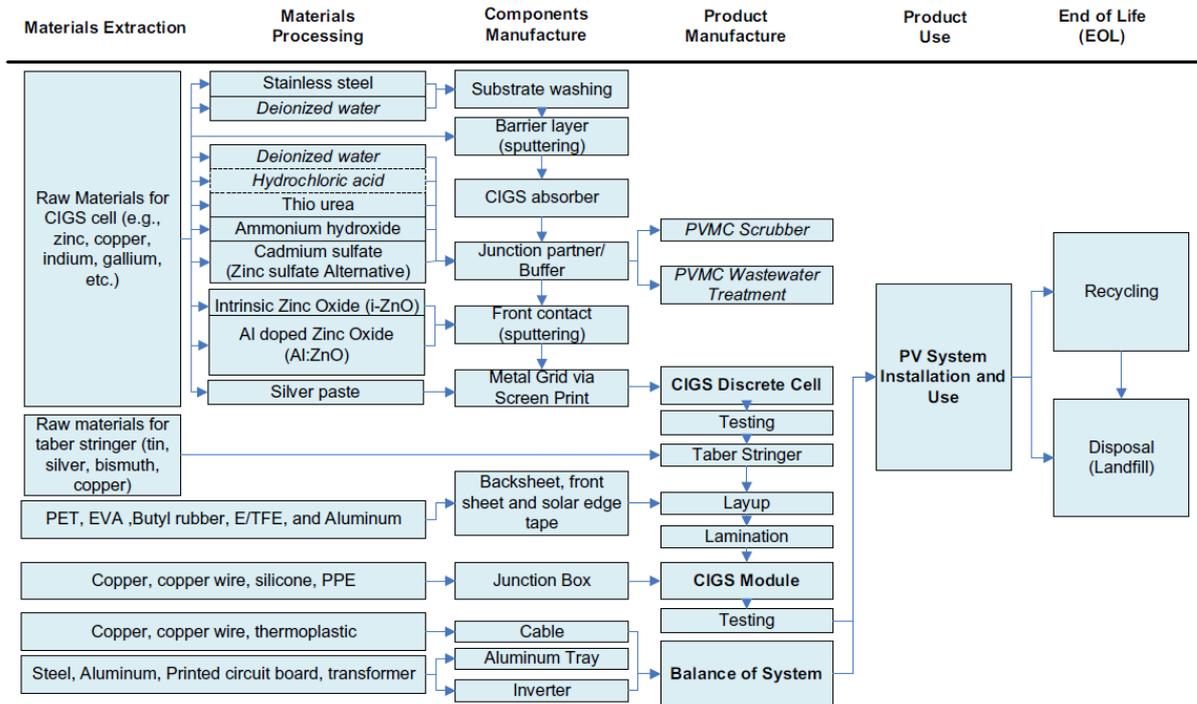
As Figuras 22-24 representam os diagramas de inventário dos sistemas elaborados respectivamente, pelos autores: Lunardi *et al.* (2018), que comparam cenários de fim de vida, com destaque para a reciclagem; Amarakoon *et al.* (2018), que aprofundam a análise nas fases de produção; Aryan, Font-Brucart e Maga (2018), comparam cenários de fim de vida entre incineração e pirólise.

Figura 22 – Esquema de processos de produção e alternativas de reciclagem.



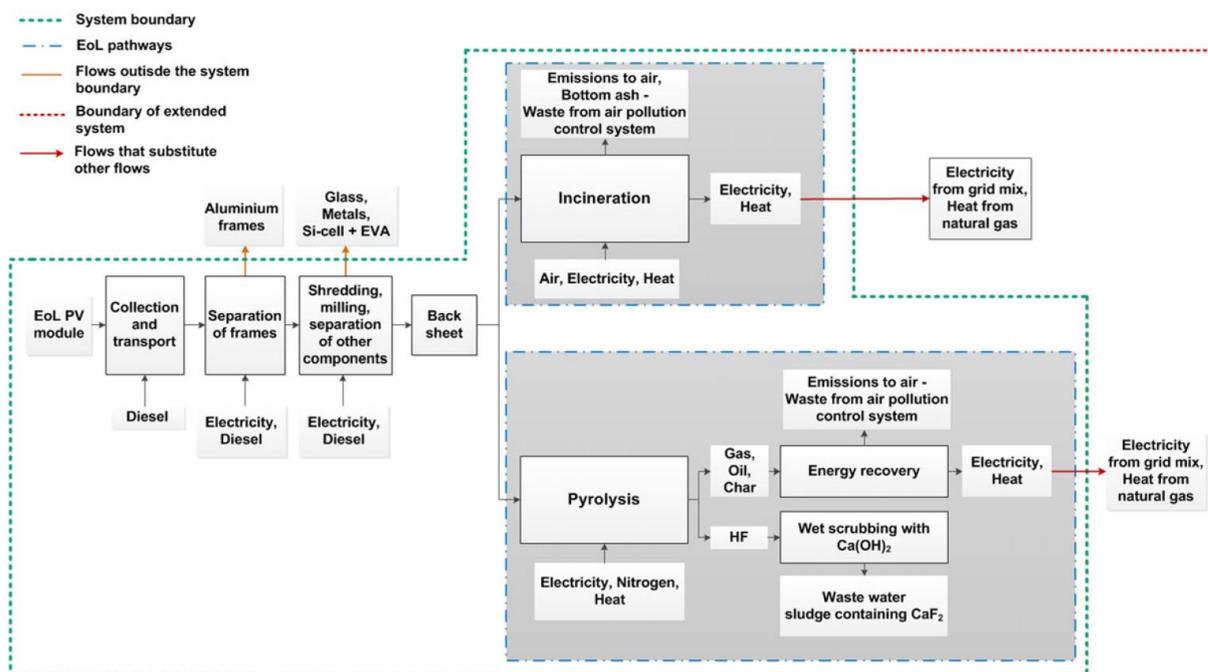
Fonte: Lunardi *et al.*, 2018, p.4.

Figura 23 – Processos e fluxos da produção de um sistema fotovoltaico CIGS.



Fonte: Amarakoon *et al.*, 2018, p.854.

Figura 24 – Inventário da ACV de fim de vida de backsheet.



Fonte: Aryan, Font-Brucart e Maga, 2018, p. 446.

Aryan, Font-Brucart e Maga (2018) concluíram que deve ser incentivado o uso de materiais a base de PET ou outra base biológica para a fabricação do *backsheet* e evitar o uso de fluoropolímeros ou polímeros halogenados nos módulos fotovoltaicos. E por fim, casos sejam utilizados, a via de tratamento deve ser a incineração, e não a pirólise, buscando evitar emissões tóxicas.

Amarakoon *et al.* (2018) destacam que o baixo peso do sistema é benéfico, pois resulta em estrutura de suporte menos robusta, reduzindo o volume de material empregado e, por consequência, o impacto do ciclo de vida.

Lunardi *et al.* (2018) mostram que, independentemente da estratégia de reciclagem utilizada, os impactos sempre são menores do que a destinação a aterro, incineração ou reuso. E destas, a incineração é a que apresenta os maiores impactos em todas as categorias, principalmente devido ao consumo de energia. Dá-se especial destaque para o uso de substâncias tóxicas nos processos químicos de reciclagem. Ainda assim, para os autores, a combinação de métodos térmicos e químicos pode alcançar ótimos índices de reciclagem e recuperar a maioria dos materiais dos painéis.

Alguns autores abordam o tempo de *payback* de energia (ou seja, quanto tempo leva

para o sistema produzir a quantidade de energia necessária para sua produção). Dos estudos analisados nesta pesquisa, quatro deles também apresentam esse tipo de análise. Para Xu *et al.* (2018), nos países analisados, o tempo de *payback* de energia fica entre 0,8 e 5,6 anos, o que demonstra a eficiência dos sistemas atuais. Para Amarakoon *et al.* (2018), 1,91 anos, para Bezerra, Lira e Silva (2018) são 2,94 anos, e para Constantino *et al.* (2018), o resultado variou entre 2,91 e 5,16 anos. Ou seja, de modo geral, a maioria dos sistemas analisados, retorna o investimento energético feito entre 0,8 e 5,6 anos.

A partir da análise geral dos estudos de caso, nota-se a relevância de se considerar todas as etapas de ciclo de vida para cada situação em específico, devido ao fato de que algumas etapas poderem causar maior ou menor impacto ambiental dependendo do cenário geral. Como demonstram Tannous *et al.* (2018) e Li, Roskilly e Wang (2018), vale ressaltar a importância de se englobar as etapas de fim de vida e o impacto positivo da reciclagem. Além disso, para maior precisão dos dados, deve-se levantar todos os meios de transporte que possam estar incluídos nos limites do sistema (XU *et al.*, 2018).

Quando comparadas alternativas de gestão de fim de vida como reciclagem e gestão de resíduos (ESKEW *et al.*, 2018), a reciclagem é a alternativa que causa menor impacto. Isso acontece mesmo que essa etapa consuma recursos e gere poluentes devido aos processos de moagem e queima ou derretimento, por reinserir o material no ciclo de vida. Em específico, quando comparadas situações de aterro e incineração (LUNARDI *et al.*, 2018), a incineração é o processo que causa maiores impactos.

Ademais, pode-se considerar a produção nacional como uma alternativa de menor impacto ambiental em comparação a importação, como demonstram Eskew *et al.* (2018) e Oliveira, Rodrigues e Luz (2018). Entretanto, essa discussão é suscetível à região analisada, e por isso, vale ressaltar a importância da avaliação específica das regiões geográficas, levando em consideração localizações e distâncias percorridas de modo detalhado.

Enfatiza-se as especificidades de cada caso, sendo relevantes as análises regionais, devido às características específicas do local. Algumas destas são: tipos de transporte e combustíveis mais utilizados em cada país, resultando em grandes variações de

impacto; distâncias percorridas por estes meios de transporte; modelos de painéis mais utilizados regionalmente; localizações das fontes de matéria-prima; fontes de energia predominantes em cada país, renováveis ou não-renováveis.

A revisão bibliográfica demonstra que, não necessariamente, os estudos que incluem o termo “avaliação de ciclo de vida” (*life cycle assessment*) apresentam, de fato, um caso de ACV. Por exemplo, alguns estudos apresentam metodologias ainda anteriores a aplicação da ferramenta de ACV, dando destaque a eficiência (KOO; HONG; PARK, 2018; CONSTANTINO *et al.*, 2018) e custo do sistema, analisando de modo bastante raso o inventário do ciclo de vida e o impacto ambiental das diferentes etapas do mesmo. Além disto, percebe-se também, análises de ACV desenvolvidas por modelos matemáticos ou para uma única categoria de impacto, como emissão de gases de efeito estufa, por exemplo. Isto demonstra a ampla variabilidade de resultados sujeita às diferentes metodologias, dificultando a comparação entre os estudos de caso de ACV elaborados por meio de métodos matemáticos ou softwares.

Alguns estudos encontrados, tratam de revisões bibliográficas (LUDIN *et al.*, 2018; ZHANG; WANG; YANG, 2018), de análise econômica (KOO; HONG; PARK, 2018), e de eficiência energética do sistema (OLIVEIRA; TRIGOSO; GASI, 2018). Estes, apresentam informações relevantes para a pesquisa, porém foram excluídos da tabela de revisão bibliográfica (TABELA 2) por não englobarem estudo de caso e resultados de ACV por categorias de impacto. Sendo assim, dos aproximadamente 30 estudos levantados para esta revisão bibliográfica, apenas 18 deles tratam de ACV em *software* com resultados referentes a categorias de impacto. Essa discussão é fundamentada pela análise da Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Compilação Revisão Bibliográfica ACV.

REF., ANO, LOCAL	PERIÓDICO	SOFTWARE E MÉTODO	LIMITES DO SISTEMA	MODELO DO PAINEL	UN. FUNC.	MAIOR IMPACTO
Amarakoon <i>et al.</i> , 2018 Nova Iorque, EUA	International Journal of Life Cycle Assessment	GaBi v6	Produção	Tecnologia CIGS	kWh / m ²	Extração da prata e produção dos conectores.
Aryan, Font-Brucart, Maga, 2018 Europa	Progress in Photovoltaics	GaBi 7.3.3	Fim de vida: incineração e pirólise	Backsheets de PET e PVDF	1000 m ² de backsheet em fim de vida	Emissões de fluoroacetato pela reciclagem de PVDF, sendo a pirólise a alternativa de maior impacto.

Bezerra, Lira e Silva, 2018 Nova Olinda, Piauí	Congresso Brasileiro de Energia Solar	SimaPro 8 ReCiPe Demanda de Energia Acumulada (CED)	Produção "do berço ao portão" Processo de transformação do silício	JKM315P-72 Jinko Solar	1 painel	Produção do silício MG-Si devido às grandes quantidades de metais pesados em sua composição. Ecotoxicidade marinha e de água doce, eutrofização de água doce e toxicidade humana.
Constantino <i>et al.</i> , 2018 Nordeste do Brasil	Energies	Modelo matemático existente	Da produção (chinesa) a reciclagem	Multi-Si 1,1 MWP de capacidade instalada	CO ₂ eq / kWh	Taxas de emissão.
Eskew <i>et al.</i> , 2018 Bangkok, Tailândia	Renewable Energy	SimaPro Ecoinvent ReCiPe 1.13	Da produção ao fim de vida (tratamento de resíduos e reciclagem)	Multi-Si	Geração de 2190 kWh pelos próximos 30 anos	Produção do módulo. Importação e gestão de resíduos causam maior impacto do que a produção nacional e reciclagem.
Li, Roskilly e Wang, 2018 Nordeste da Inglaterra	Applied Energy	GaBi profissional v6.115 Ecoinvent 3.1 CML; ReCiPe;	Produção, instalação, operação e fim de vida	s-Si, p-Si, CdTe	MWh	Fabricação do modelo de silício na maioria das categorias de impacto e CdTe por mudanças climáticas em fim de vida e depleção de ozônio na produção.
Luo <i>et al.</i> , 2018 Singapura, Malásia	Solar Energy Materials and Solar Cells	Ecoinvent 3.3	Desde a mineração da areia de sílica até a instalação do sistema fotovoltaico	Multi-Si	1 módulo de silício de 60 células	Extração do minério de silício e produção da célula.
Lunardi <i>et al.</i> , 2018 Sydney, Austrália	Applied Sciences	GaBi v6 Ecoinvent 2 ReCiPe 2016	aterro, incineração, reuso ou reciclagem	Módulo silício cristalino (c-Si)	1 kg de resíduo de módulo fotovoltaico de silício	Incineração seguido de aterro.
Mahmud <i>et al.</i> , 2018 Sydney, Austrália	Energies	SimaPro 8.5	Da extração da matéria-prima a gestão do resíduo	Sistema híbrido aquecimento de água e geração de energia S-Si	1 kWh de energia produzida	Depleção de recursos naturais para baterias e depleção de ozônio e recursos hídricos para o painel
Oliveira, Rodrigues e Luz, 2018 Brasil	Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida	GaBi educacional 2016 Midpoint CML 2001	Produção do silício e do painel para produção chinesa com importação do painel e importação da célula e produção nacional do painel	Modelo genérico silício policristalino	1 kWh	Produção chinesa causa maior impacto que a brasileira. A produção do módulo é a etapa que causa maiores impactos.
Rajpud <i>et al.</i> , 2018 Índia	Solar Energy	análise de métricas de energia	[não explícita]	3,2kW CdTe	[não explícito]	[não explícito]
Souliotis <i>et al.</i> , 2018 Grécia	Renewable Energy	SimaPro 8.2 Ecoinvent 3.3	Produção, uso e descarte	Sistema híbrido aquecimento de água e geração de energia p-Si	[não explícito]	Produção da célula.
Tannous <i>et al.</i> , 2018 Líbano	Journal of Cleaner Production	SimaPro IMPACT 2002	Produção, uso e fim de vida (aterro e reciclagem)	sistema solar autônomo ou tradicional para iluminação urbana	12h de iluminação por dia para 20 anos	Bateria de chumbo ácido. Porém, o sistema tradicional causa maiores impactos independente do cenário de fim de vida.
Xie <i>et al.</i> , 2018 China	Journal of Cleaner Production	Investigação em website, questionários e monitoramento de campo	Extração da sílica e produção dos sistemas, excluindo transportes	Comparação entre 4 modelos disponíveis na China: silício solar, wafers de silício, célula de silício e painel fotovoltaico	1 ton silício; 10mil wafers; 1m ² célula; 1m ² painel	"solar grade silicon" por agentes cancerígenos, inorgânicos respiratórios e combustíveis fósseis.

Xu <i>et al.</i> , 2018 China	Journal of Cleaner Production	Método quantitativo, manual	Extração do silício, produção, uso e reciclagem	SoG-Si	Sistema de 1 kWp, de 5 módulos 200 W com 54 células multi-Si	Fase de produção [análise de custo]
Pupin, 2019 Brasil	dissertação	SimaPro CMLIA	Extração da sílica a produção do painel	[não explícito]	250 kWh	A produção do painel causa maior impacto em todas as categorias.
Corcelli <i>et al.</i> , 2019 Barcelona, Espanha	Resources, Conservation & Recycling	SimaPro	Produção, instalação, manutenção e fim-de-vida	Comparação entre horta urbana e microssina solar	1m ² de fotovoltaico e 1m ² de estufa	Ecotoxicidade terrestre e depleção de recursos hídricos são os maiores impactos do sistema solar.
Rahman, Alam e Ahsan, 2019 Bangladesh	Journal of Renewable Energy and Development	[não explícito]	Produção e transporte dos componentes	Sistema solar fotovoltaico de 3,6 kWp	1 kWh de eletricidade gerada	Baterias e módulos fotovoltaicos representam o maior impacto por emissão de gases de efeito estufa.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise da Tabela 2, foi possível perceber que nos estudos que abordam o ciclo de vida incluindo as etapas de produção à gestão do fim de vida, as fases de produção são as que resultam nos impactos mais significativos. Mais ainda do que a produção do painel, quando detalhada a produção da célula de silício em si, esta causa maior impacto do que a produção dos demais componentes.

Sendo assim, a Tabela 2 permitiu analisar dados gerais acerca dos estudos já publicados. Porém, a fim de fundamentar a análise dos impactos e interpretação dos resultados, foi elaborada a Tabela 3, de modo a concluir quais categorias de impacto são mais relevantes para a discussão final da pesquisa.

A Tabela 3, demonstra que as categorias de impacto mais analisadas pelos estudos levantados são acidificação (terrestre, marinha e de água doce), eutrofização (marinha e de água doce), toxicidade humana, ecotoxicidade e depleção da camada de ozônio, respectivamente. Como a nomenclatura e especificação de cada categoria pode variar dependendo do método de cálculo utilizado, se faz necessário adaptações. Por isso, para utilizar tal referência para a análise a partir do método de cálculo ILCD 2.0 2018 da Ecoinvent, estas categorias podem ser traduzidas como: acidificação terrestre e de água doce; eutrofização de água doce, marinha e terrestre; saúde humana (como macrocategoria); ecotoxicidade de água doce.

Tabela 3 – Categorias de impacto analisadas pelos estudos da Revisão Bibliográfica.

Ref., ano	Acidificação	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade	Eutrofização	Material Particulado	Mudanças climáticas	Oxidantes fotoquímicos	Payback de energia	Radiação Ionizante	Recursos Fósseis	Recursos Hídricos	Recursos Minerais e Metais	Toxicidade humana	Uso do solo	Outras
Amarakoon <i>et al.</i> , 2018	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	Smog
Aryan, Font-Brucart, Maga, 2018	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-	X	-	-	X	-	-
Bezerra, Lira e Silva, 2018	X	-	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	X	X	X	-
Constantino <i>et al.</i> , 2018	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	gases de efeito estufa, tempo de retorno de emissão
Eskew <i>et al.</i> , 2018	X	-	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	-	-
Li, Roskilly e Wang, 2018	X	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	Circularidade
Luo <i>et al.</i> , 2018	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	gases de efeito estufa
Lunardi <i>et al.</i> , 2018	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	depleção de elementos abióticos
Mahmud <i>et al.</i> , 2018	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	Depleção de recursos renováveis
Oliveira, Rodrigues e Luz, 2018	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	X	-	X	-	consumo de energia
Rajpud <i>et al.</i> , 2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Emissão de CO ₂ , potencial de mitigação de CO ₂ e créditos de carbono
Souliotis <i>et al.</i> , 2018	X	-	X	X	X	-	X	-	-	X	X	-	X	X	X	-
Tannous <i>et al.</i> , 2018	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	X	X	energias não-renováveis
Xie <i>et al.</i> , 2018	X	-	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	X	X	-	-
Xu <i>et al.</i> , 2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Emissões de CO ₂ e SO ₂
Pupin, 2019	X	X	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	Depleção abiótica
Corcelli <i>et al.</i> , 2019	X	-	X	X	X	-	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-
Rahman, Alam e Ahsan, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	Consumo de energia primária
18	12	6	9	10	12	5	7	4	5	4	7	4	7	11	4	

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da revisão bibliográfica, tratando dos estudos analisados, em específico àqueles nos quais foram aplicadas ferramentas de ACV, foi possível comparar, de modo mais claro, abordagens, diferentes métodos utilizados, limites inventário, unidade funcional e principais resultados, para uma visão geral do estado da arte.

Pode-se observar o caráter único de cada estudo analisado, afinal, considerando-se diferentes localizações, métodos e sistemas, mesmo que para um produto similar, são obtidos resultados contrastantes quanto aos impactos ambientais. Além disso, dos estudos brasileiros analisados, percebe-se que ainda há espaço para uma avaliação dos impactos ambientais das diferentes alternativas de fim de vida do sistema, o que ratifica a demanda pelos resultados desta pesquisa, almejando orientar qual a melhor estratégia para gestão de resíduos fotovoltaicos no Brasil.

2.5.2 Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos

Nesta seção, são discutidos estudos recentes que abordam a reciclagem dos painéis fotovoltaicos. De modo geral, são abordadas estratégias para separação e reciclagem dos materiais que compõem o sistema e alternativas de viabilidade das ações.

Mahmoudi *et al.* (2019) apresentam uma revisão bibliográfica sobre a reciclagem do sistema, e consideram que existe demanda por mais estudos acerca da gestão do resíduo fotovoltaico. Para os autores, deve-se promover estratégias como a criação de um sistema que monitore globalmente o volume de resíduo e as possibilidades de tratamento nas diversas escalas, a fim de incentivar a pesquisa por soluções mais eficientes e efetivas para a gestão deste tipo de resíduo.

Para Deng *et al.* (2019), quando os materiais não são separados de modo adequado para reciclagem, podem ser considerados “altamente misturados”, ou de baixa pureza, o que resulta em diminuição de valor. Por isso, a importância de se buscar estratégias de baixo custo econômico para a separação, a fim de garantir o custo-benefício da reciclagem e a sustentabilidade econômica dessa alternativa de fim de vida.

Para Tannous *et al.* (2018), o cenário de reciclagem do sistema resulta em impacto ambiental positivo (ou seja, não causa impacto negativo e ainda reinsere recursos no

ciclo de vida do sistema) nas categorias de agentes não cancerígenos e extração de minério, quando em comparação ao sistema tradicional de geração de energia. Sendo assim, percebe-se a importância de prever a reciclagem como alternativa de fim de vida dos elementos dos sistemas para a redução dos índices de impacto ambiental.

Deng *et al.* (2019) mostram que a deposição de resíduo em aterro causa desperdício permanente de recursos, ou seja, perda de recursos que poderiam ser reutilizados. De modo geral, por uma perspectiva ambiental, reaproveitamento ou reciclagem são preferíveis às alternativas de incineração ou aterro. Contudo, a efetiva implementação de estratégias de reciclagem depende de recursos financeiros, por isso, os autores confirmam que a destinação a aterro sanitário é a mais barata, porém, a que apresenta maior impacto. Por fim, os autores enfatizam o fato de que ainda não existe volume suficiente de material obsoleto para fundamentar a análise na prática.

Para Nevala *et al.* (2019), atualmente, encontra-se um cenário no qual a primeira geração de painéis está alcançando seu fim de vida. Porém, ainda não se pode definir a melhor tecnologia disponível para lidar com a gestão desses resíduos, sobretudo, ao se considerar princípios de economia circular para o tratamento desses materiais.

Para Li, Roskilly e Wang (2018), menos da metade do material consumido e do resíduo gerado são materiais reciclados ou recicláveis. Contudo, do mesmo modo, ainda não há volume suficiente de painéis fotovoltaicos obsoletos para que a indústria busque estabelecer uma abordagem padrão de gestão de resíduo fotovoltaico.

Yang *et al.* (2019) abordam a relevância do volume de matéria-prima desperdiçada durante o processo produtivo da célula fotovoltaica, discutem a reciclagem do material na fase de corte das células fotovoltaicas e propõem um método de reciclagem por meio de lixiviação ácida, calcinação e desoxidação. Para os autores, o maior volume de resíduos que compõem o sistema são os pedaços de quartzo e silício.

Para Mahmoudi, Huda e Behnia (2019), o vidro é o material de mais fácil reciclagem e representa a maior parcela de volume de material em um painel fotovoltaico. Os autores também destacam que o alumínio e o cobre são materiais com grande potencial para reciclagem. Duflou *et al.* (2018) ratificam que, apenas parcela do vidro, alumínio, cobre e aço podem ser recuperadas e inseridas em um novo ciclo, porém, células de silício e plásticos devem ser incinerados ou aterrados.

Como demonstram Lunardi *et al.* (2018), o processo de reciclagem tem início com a separação mecânica da caixa de junção e da moldura de alumínio. Para os autores, o vidro pode ser separado por completo sem quebras e reaproveitado diretamente em outro painel, por processo térmico. Entretanto, essa alternativa não é confirmada nos demais estudos.

Para os autores, o processo químico se inicia com o derretimento da camada de EVA (acetato-vinilo etileno) e a utilização de solventes para promover essa reação. Os autores indicam a utilização de tolueno como solvente por ser o mais barato e mais estável entre as opções. E além disto, assumem que 80% do silício de novas células podem ser obtidos deste processo de reciclagem. Os autores consideram que é possível recuperar 100% da prata dos conectores neste processo de separação, e mesmo que as células sejam quebradas, também podem ser recicladas.

Aryan, Font-Brucart e Maga (2018), utilizam dos métodos de trituração e moagem para a separação dos materiais do módulo. Contudo, segundo a revisão bibliográfica apresentada por Deng *et al.* (2019), três processos de delaminação também podem ser considerados para separar o vidro dos materiais laminados do painel:

- delaminação mecânica (consumo químico e energético baixo): na maioria dos exemplos, trata-se de quebrar o material, e recuperar as peças separadas, com um mínimo de 80% do vidro recuperado;
- delaminação térmica (consumo químico e energético alto): trata-se da decomposição térmica da camada de EVA. Segundo os autores:

A camada de encapsulamento polimérico, principalmente EVA, pode ser pirolisada em ácido acético, propano, propeno, etano, metano e outros óleos e gases combustíveis em um ambiente de gás inerte ou queimada em um ambiente de oxigênio. (DENG *et al.*, 2019, p.535)

- delaminação química (consumo químico e energético muito alto): o EVA é dissolvido por solventes, que podem ser orgânicos ou inorgânicos.

Posterior à delaminação, é preciso ser feita a separação dos conectores da célula. De acordo com Deng *et al.* (2019), os conectores de prata e cobre são dissolvidos em meio aquoso para a reciclagem dos metais. Como demonstram os autores, os processos não térmicos, eliminam as preocupações com a queima do *backsheet* e emissões de dióxido de carbono, porém, a separação eficiente do plástico, vidro e

célula de silício posterior a quebra ainda é complexa. Deng *et al.* (2019) consideram que a delaminação térmica é a única opção para a recuperação da célula com alta pureza e por inteiro, sem quebras.

Nevala *et al.* (2019) discutem a fragmentação eletro-hidráulica (*electro-hydraulic fragmentation*, EHF) como uma alternativa eficiente para a separação e recuperação de materiais que compõem as células fotovoltaicas, como por exemplo, silício, prata, cobre, estanho, chumbo e alumínio (Si, Ag, Cu, Sn, Pb, Al). O estudo apresenta uma análise comparativa entre a técnica EHF e a fragmentação convencional dos módulos fotovoltaicos. Por fim, os autores ratificam a eficiência da técnica para a separação dos materiais que compõem o painel e confirmam sua viabilidade.

Para Nevala *et al.* (2019), componentes químicos como cádmio (Cd) e chumbo (Pb) são considerados ambientalmente tóxicos, principalmente no caso dos painéis em fim de vida. Além disso, justificam o reaproveitamento de metais como prata, cobre, gálio, índio, chumbo e cádmio (Ag, Cu, Ga, In, Pb, Cd) por serem desejáveis e valiosos.

Azeumo *et al.* (2019) tratam dos métodos hidrometalúrgico e térmico, para tratamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida, caracterizando o primeiro como mais complexo e o segundo (também chamado pirometalúrgico), como o que apresenta mais impactos ambientais por maior consumo de energia, emissão de gases e poeira. Os autores apresentam uma metodologia para a reciclagem do painel fotovoltaico e os resultados dos testes, concluindo que tolueno e xileno são os melhores solventes para a dissolução do EVA. Algumas técnicas para a gestão desse tipo de resíduo podem ser fundamentadas pelo estudo de Azeumo *et al.* (2019):

- tratamento térmico para separar as camadas do módulo;
- terceirizar o tratamento da moldura de alumínio e do vidro;
- tratamento da célula com ácido para dissolver as camadas metálicas que a cobrem;
- dissolução do EVA (acetato-vinilo etileno) para obtenção do silício puro;
- tratamento químico com solvente em diferentes temperaturas para separar as camadas de vidro, silício e EVA;
- desmontagem manual da moldura de alumínio e da caixa de junção e corte do módulo em amostras homogêneas para facilitar a operação.

Faircloth *et al.* (2019) comparam o destino a aterros sanitários e a reciclagem na

Tailândia, apresentando os custos da deposição em aterro. Os autores sugerem situar as centrais de reciclagem de fotovoltaicos em uma instalação de reciclagem de vidro laminado, por poder utilizar do material em pequenos lotes, conforme for necessário. Assim, eliminando a necessidade de uma usina dedicada apenas aos painéis fotovoltaicos, afinal, tal tipologia de resíduos ainda não representa volume significativo de material para operar de modo eficiente. Porém, para os autores, apenas vidro, alumínio e cobre dos fios condutores serão reciclados, e os materiais que compõem a célula possivelmente não receberão o mesmo tratamento.

Faircloth *et al.* (2019) ressaltam que os processos de extração, refinaria e fundição para a produção primária de alumínio, cobre, prata e silício, fazem uso intensivo de energia, aferindo consideráveis impactos ambientais. Porém, ainda que a reciclagem destes resulte em algum impacto ambiental, este ainda é menor que a opção de aterro.

Para Faircloth *et al.* (2019), reciclar em usina exclusiva a fotovoltaicos, é a alternativa que causa menor impacto. Depois desta, as melhores alternativas são a reciclagem em usina de vidro e a destinação a aterro, respectivamente. Ainda assim, as três alternativas resultaram em impactos similares nas mesmas categorias. Vale destacar que a reciclagem, reduz significativamente o impacto ambiental na categoria de depleção de recursos naturais, por proporcionar o reaproveitamento do material.

Pestalozzi, Eisert e Woidasky (2018) comparam fragmentação eletro-hidráulica e eletrodinâmica dos módulos fotovoltaicos CIS a fim de recuperar a parcela de In (Índio) da composição. De acordo com os resultados, ambos os métodos são eficientes para a separação dos materiais que compõem as camadas do fotovoltaico laminado.

Dentre os estudos nacionais encontrados, Prado (2018), por um lado, propõe a utilização de uma solvente para a reutilização dos metais presentes nos painéis fotovoltaicos. Esse estudo, apresenta uma alternativa de fim de vida do sistema e ratifica que, se descartado de modo incorreto, pode poluir o meio ambiente por toxicidade e lixiviação de metais em corpos d'água. O estudo representa o incipiente desenvolvimento das estratégias de reciclagem de painéis fotovoltaicos no Brasil.

Por outro lado, Dias (2015), propõe a caracterização dos materiais que compõem o painel fotovoltaico e também apresenta uma alternativa para separação destes. Segundo o autor, a partir da separação, o alumínio da moldura pode ser reciclado e o

vidro que compõe o sistema, apresenta composição similar ao do vidro convencional, podendo ser destinado às convencionais usinas de reciclagem do vidro.

Como demonstrado por Duflou *et al.* (2018) e Prado (2018), devido à complexidade da separação e alguns materiais do painel, a reciclagem de todos os componentes do sistema pode ser comprometida. Ainda assim, já existem empresas que se responsabilizam por essa etapa do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, como por exemplo, a PV Cycle (PV CYCLE, 2016), que administra o processo de reciclagem de todo o sistema fotovoltaico, entre outros resíduos eletrônicos.

Como mostram Deng *et al.* (2019), ainda não foi possível encontrar produção em larga escala de sistemas fotovoltaicos utilizando recursos reciclados em quantidade relevante. Segundo os autores, a reciclagem de painéis fotovoltaicos é pouco atrativa economicamente devido à dificuldade de separação dos materiais e ao custo que não garante o retorno financeiro da reciclagem. Porém, confirmam que o sistema gera energia limpa entre 20 e 30 anos, sem gerar impactos que não sejam as fases que antecedem e procedem o uso (produção e descarte). Por isso, ratificam que existe demanda por desenvolvimento de tecnologias de reciclagem comercialmente viáveis para fotovoltaicos em cenário de fim de vida, a fim de garantir a sustentabilidade do sistema no futuro. A partir disso, como demonstram os autores, destaca-se a importância de um projeto de produto pensado para a desmontagem e para a reciclagem, além do pré-requisito de se englobar material reciclado para a produção.

Esta revisão evidenciou que a reciclagem de sistemas fotovoltaicos obsoletos influencia diretamente na redução do impacto ambiental na categoria de depleção de recursos naturais. Alguns estudos abordaram métodos de separação dos materiais do painel de modo geral (DUFLOU *et al.*, 2018) ou da separação química (PRADO, 2018; AZEUMO *et al.*, 2019; NEVALA *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2018; PESTALOZZI; EISERT; WOIDASKY, 2018) dos materiais que compõem a célula de silício. Outros estudos abordaram as alternativas de fim de vida (FAIRCLOTH *et al.*, 2019) ou ainda algumas estratégias de reciclagem (YANG *et al.*, 2019; PRADO, 2018, DIAS, 2015).

A princípio, mesmo que recuperado, o silício não pode ser reutilizado para a produção de um novo sistema, devido a sua baixa pureza e perda de propriedades (DENG *et al.*, 2019). Ainda assim, como sugerem, Deng *et al.* (2019) o tema ainda pode ser

discutido e a possibilidade não foi excluída.

Já existem algumas alternativas de reciclagem do material laminado que compõe o sistema, como demonstram Aryan, Font-Brucart e Maga (2018), ao explicar os processos de pirólise e incineração do backsheet. Porém, estratégias como estas ainda não são comuns e demandam mais estudos.

Deste modo, pode-se considerar a reciclagem uma alternativa melhor que o aterro na maioria dos cenários (FAIRCLOTH *et al.*, 2019; DENG *et al.* 2019). Os estudos mostram que alguns materiais de mais fácil separação têm mais chances de serem reciclados do que outros, como por exemplo, vidro, alumínio e cobre dos fios condutores, por ser considerada menos complexa do que a separação dos metais e outros materiais laminados para a produção do painel. Sendo assim, ratifica-se a demanda por estudos que viabilizem alternativas de separação dos materiais que compõem o painel e promovam o reaproveitamento.

Esta revisão representa importante fundamentação para a discussão final da pesquisa quanto às alternativas de fim de vida do sistema. Contudo, a separação dos materiais e as alternativas de reciclagem do sistema ainda são um campo de pesquisa corrente que demanda desenvolvimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise foi conduzida a partir da aplicação do método de ACV, organizado em quatro etapas conforme orienta a NBR 14040 (2014):

- definição de objetivos do escopo;
- análise do inventário do ciclo de vida;
- avaliação de impactos;
- interpretação dos resultados.

3.1 Definição do objetivo e do escopo

Como evidenciado pela na revisão bibliográfica, a produção nacional dos sistemas fotovoltaicos tende a causar menor impacto ambiental, na maioria dos casos, e pode vir a ser uma tendência sustentável para o crescimento do setor no Brasil. Entretanto, esse nicho de mercado para produção nacional é ainda incipiente e ao se contatar representantes de empresas que comercializam e instalam o sistema, percebeu-se que, de modo geral, a maioria dos painéis instalados no Brasil, são importados. Isso se justifica, principalmente, devido ao pequeno número de empresas que produzem o sistema no Brasil quando comparado às opções de importação, e ao melhor custo-benefício do produto importado em relação ao nacional.

Foram contatadas empresas que produzem o sistema no país, porém, as informações disponíveis foram insuficientes, ou seja, o contato não contou com respostas eficientes para fundamentar a elaboração de uma ACV de painel fotovoltaico produzido em território brasileiro. Por isso, a partir do refinamento dos limites do sistema, foi escolhido um estudo de caso que engloba a importação do produto, para que fosse possível a aplicação de um caso já existente e o acesso a dados mais próximos da realidade.

O objetivo desta ACV foi analisar o impacto ambiental do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico no Brasil. Para isso, a análise destaca processos de importação, transporte, produção nacional da estrutura, instalação, e alternativas de fim de vida.

Sendo assim, o estudo de caso foi delimitado a partir de uma instalação realizada pela Empresa Sonnen Energia. Solicitou-se à empresa, alguns pré-requisitos para a escolha do exemplo a ser estudado:

- Instalação em cobertura;
- Instalação de grande porte, devido a maior eficiência.

Assim, a unidade funcional foi definida por um sistema composto de 228 unidades do módulo solar policristalino AS-6P da marca AmeriSolar. Cada módulo pesa 22,5 kg (SOLAR BRASIL TECNOLOGIA E ENERGIA FOTOVOLTAICA LTDA), que ao ser multiplicado pelos 228 módulos, resulta num total de 5130 kg. A esse peso também foi adicionado o valor da estrutura SolarFix produzida pela Sonnen Energia, que utiliza de aproximadamente 462 kg de alumínio (APÊNDICE A). Além disso, outras características mecânicas do sistema também são representadas na Tabela 4 a seguir, conforme o catálogo da AmeriSolar.

Tabela 4 – Características mecânicas do módulo solar policristalino AS-6P Amerisolar

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	
Tipo de células	Policristalino 5BB 156X156mm
Número de células	72
Dimensões do módulo	1956x992x40mm
Peso	22,5 kg
Cobertura Frontal	3.2mm vidro temperado com baixo teor de ferro
Moldura	Alumínio anodizado
Caixa de Conexão [Caixa de Junção]	IP67, 3 diodos
Cabo	4mm ² , 1000mm
Conector	MC4 ou compatível com MC4

Fonte: Solar Brasil Tecnologia e Energia Fotovoltaica LTDA.

A instalação engloba uma área total de aproximadamente 450m², instalada em telhado inclinado, na cidade de Uruguaiana, no Rio Grande do Sul (APÊNDICE A), como demonstrado pela Figura 25.

Figura 25 – Foto da instalação analisada como estudo de caso.



Fonte: Sonnen Energia, 2020.

Além dos dados quantitativos da instalação fornecidos pela empresa, a revisão bibliográfica também fundamenta a elaboração do inventário e orienta a determinação dos limites do sistema.

Com relação ao fim de vida, Aryan, Font-Brucart e Maga (2018) consideram que análises de fim de vida incorporam etapas como: coleta do sistema obsoleto e transporte para o sítio de tratamento; fase inicial de tratamento, que pode ser considerada a desmontagem; o tratamento em si; e por fim, a destinação do resíduo gerado por esse tratamento. No caso da presente pesquisa, se faz necessário adicionar as fases de transporte desde a desmontagem do painel, até às diferentes localidades, afinal, os diferentes materiais que compõem o painel, comumente, não seriam tratados na mesma usina.

Ademais, pôde-se concluir a partir da revisão bibliográfica, a implementação de estratégias de reciclagem do sistema depende de processos complexos para a separação dos materiais do painel, como vidro, célula de silício e condutores.

Ao se buscar estratégias para a gestão de resíduos eletroeletrônicos encontrou-se o Descarte Legal, que é uma solução que alia tecnologia e sistemas de gestão de RSU

já implementada no Brasil. O Descarte Legal funciona por meio de website e aplicativo, no qual oferece informações para o descarte de resíduos nas cidades. A empresa é sediada em Belo Horizonte e atua principalmente no estado de Minas Gerais. No website, o usuário informa o tipo de resíduo que precisa descartar e a região em que se encontra. A partir disso, a plataforma fornece os dados das “empresas licenciadas e ambientalmente aptas a dar uma destinação adequada aos resíduos de acordo com as normas legais” (DESCARTELEGAL, 2017). Essa estratégia incentiva o descarte de resíduos por meio alternativo às empresas de coleta municipal e ao aterro, promovendo o acesso à informação e facilitando a tarefa aos cidadãos interessados. Em contato com a Descarte Legal, a empresa informa que no caso de painéis fotovoltaicos, em um cenário atual, pode-se garantir a reciclagem da moldura de alumínio, por ser de fácil desmontagem. Entretanto, é possível que os demais materiais laminados sejam destinados à incineração.

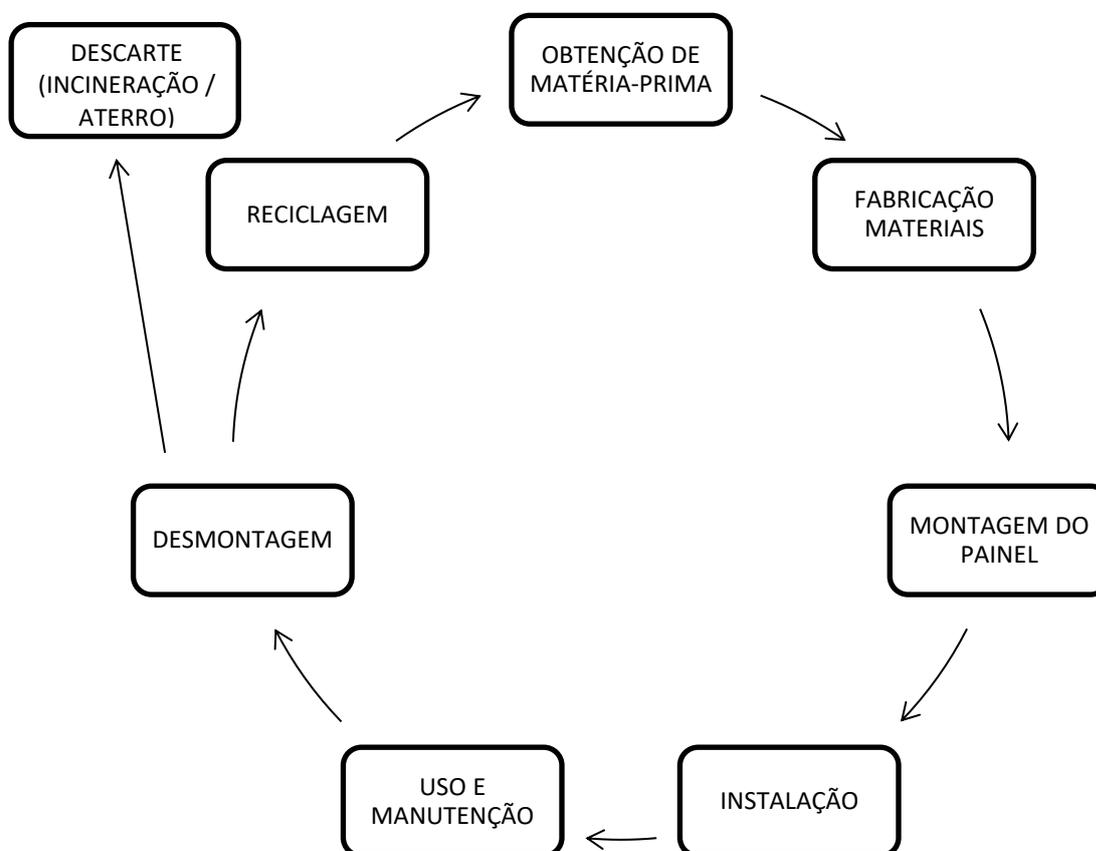
Sendo assim, neste estudo de caso, os limites do sistema englobam a montagem do painel, transportes, instalação, desmontagem, reciclagem do alumínio, e para os demais materiais laminados, foram comparadas as situações de aterro sanitário e incineração.

3.2 Análise do Inventário

3.2.1 Definição dos processos

Devido à complexidade de se encontrar informações precisas referentes aos processos produtivos de cada material que compõe o painel fotovoltaico, foi elaborada uma revisão referente a esses processos. Tais informações foram obtidas por meio de conteúdo publicado *online*, disponibilizado por empresas da área, demonstrando os processos internos nas fábricas. Assim, considerando que parte do material será reciclado em seu fim de vida, seu ciclo pode ser representado conforme a Figura 26.

Figura 26 – Ciclo de vida do painel fotovoltaico.



Fonte: elaborado pela autora.

Deste modo, pode-se organizar o sistema em alguns processos principais como:

- **Montagem do painel:** a partir do transporte dos materiais para a fábrica de painéis fotovoltaicos, o processo parte da limpeza do vidro e da interconexão das células. Na célula de silício, são impressos ou colados os conectores de prata. A partir disso, as células são posicionadas e montadas sobre o filme encapsulante e o vidro, no qual, as mesmas são conectadas manualmente. Em seguida, ocorre o empilhamento dos demais materiais, posicionando nesta ordem, a segunda camada de filme encapsulante e o *backsheet*. Assim, o módulo é laminado a fim de fixar esse “sanduíche” de materiais. Em seguida, é conectada a caixa de junção e instalada a moldura de alumínio. (PORTAL SOLAR, 2019)
- **Instalação do sistema:** inclui a entrada do material que compõe a estrutura da instalação e do inversor solar. No caso da instalação em edificações, usualmente é utilizada estrutura de alumínio que pode ser comercializada e instalada por uma empresa terceirizada. O inversor solar também é inserido nesta etapa e geralmente

também terceirizado. Sua instalação deve ser em local de fácil acesso à manutenção, provido de espaço para ampliação, e protegido de chuva e sol.

- Uso e manutenção: com frequência, os sistemas fotovoltaicos dependem de limpeza a fim de garantir sua eficiência. Qualquer sombreamento ou material depositado (poeira, folhas, fezes de animais) sobre os painéis, implica diretamente em perda de produção de energia (PORTAL SOLAR, 2019).

Considerando-se a média de 25 anos de vida útil dos painéis fotovoltaicos (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019), normalmente os sistemas serão removidos do local de instalação apenas para sua substituição devido a obsolescência ou a busca por maior eficiência (substituição por modelos mais novos ou mais eficientes).

- Desmontagem: a caixa de junção, a estrutura e a moldura de alumínio podem ser desmontadas do painel manualmente de modo bastante simples. Porém, os materiais laminados dependerão de processos mais complexos para sua separação como elucidado na revisão bibliográfica (NEVALA *et al.*, 2019; AZEUMO *et al.*, 2019; PESTALOZZI; EISERT; WOIDASKY, 2018; PRADO, 2018; DIAS, 2015).

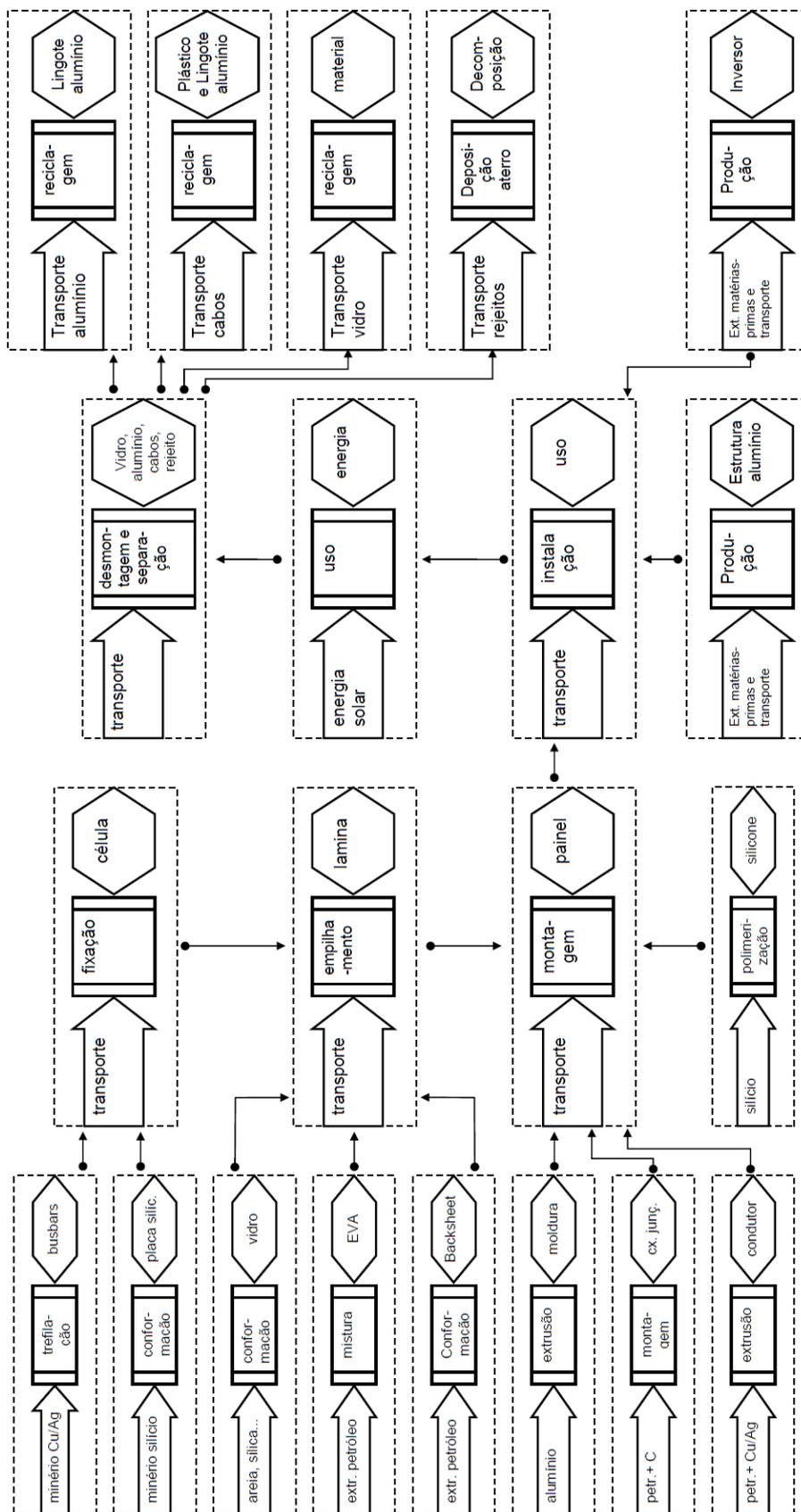
- Reciclagem: dentre os materiais que compõem o sistema, o alumínio é um dos mais reciclados no Brasil (DESCARTE LEGAL, 2019). Por isso, assume-se sua reciclagem nesse estudo de caso. Entretanto, os demais materiais possivelmente terão outra destinação (aterro, incineração, etc.)

- Incineração: os demais materiais laminados no painel serão incinerados como representa as situações convencionais da gestão desse tipo de resíduo no Brasil (DESCARTE LEGAL, 2019).

3.2.2 Modelo de Sistema Geral do Inventário do Ciclo de Vida

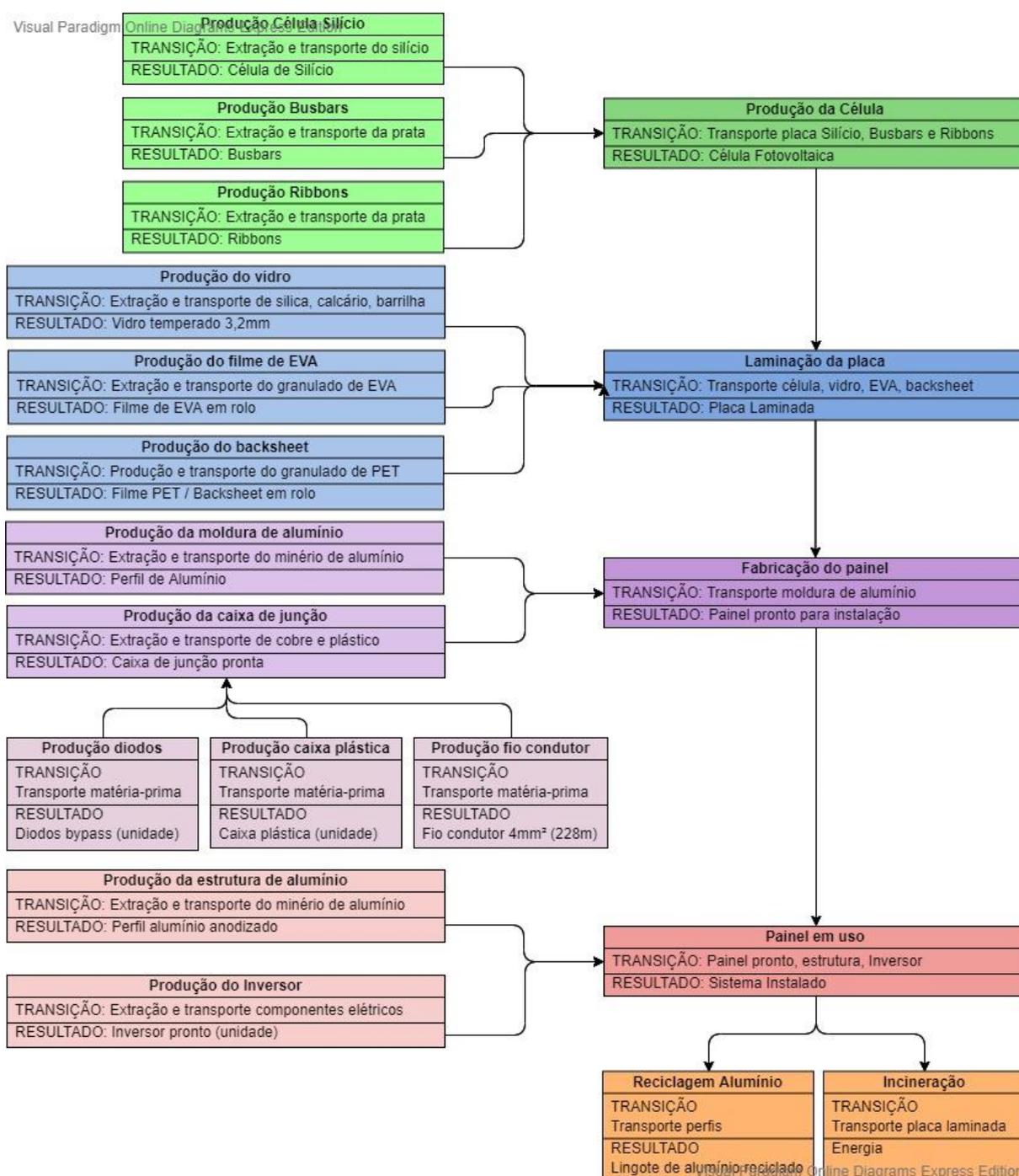
A partir da análise dos processos desse estudo de caso, foi elaborado o Modelo de Sistema Geral, como orienta Pereira (2012), representado pela Figura 27 a seguir. Além deste, outras metodologias para a elaboração do ICV (Inventário do Ciclo de Vida) foram analisadas, como as orientadas por Gomes e Pereira (2014). Com o apoio de *software* aberto disponível online para diagramação, o ICV resultou no modelo da Figura 28.

Figura 27 – Diagrama preliminar do Inventário do Ciclo de Vida.



Fonte: elaborado pela autora, baseado em Pereira (2012).

Figura 28 – Diagrama final do Inventário do Ciclo de Vida.



Fonte: elaborado pela autora, baseado em Gomes e Pereira (2014).

O diagrama de ICV representado pela Figura 27, foi aperfeiçoado conforme o avanço da pesquisa e as simulações de resultados preliminares, fundamentando o modelo final (FIGURA 28). Em princípio, foram levantados todos os elementos e processos do ciclo de vida dos quais se obteve acesso a informações (FIGURA 27), porém, ao

se consultar as bases de dados, os limites do sistema foram elaborados de modo mais direto (FIGURA 28), orientando-se para os fluxos e processos já fornecidos pelas bases de dados. Assim, nesta seção, optou-se por apresentar ambos os modelos a fim de ilustrar as adaptações do ICV conforme o avanço da pesquisa.

3.2.3 Dados Quantitativos

Para que a ACV fosse elaborada no OpenLCA, foram realizados testes e exercícios fundamentados por tutorial disponível no site (OPENLCA, 2019) a fim de adquirir aprendizado suficiente para a elaboração da ACV com apoio do *software*.

Pôde-se perceber, pela revisão bibliográfica, que a maioria dos estudos elaborados na área fazem uso de *softwares*, bases de dados e métodos de cálculo pagos, ou restritos. Por isso, uma das principais diretrizes desta pesquisa foi, justamente, tirar proveito de recursos gratuitos. Sendo assim, são utilizados *softwares* e métodos de cálculo de livre acesso *online*. Quanto à base de dados, esta, foi disponibilizada gratuitamente pela Ecoinvent para fins acadêmicos. A partir disso, para sua utilização, foi realizada extensa e detalhada análise dos dados disponíveis, a fim de se conhecer quais poderiam ser aproveitados, e quais precisariam ser estimados.

A coleta de dados partiu das informações fornecidas pela Sonnen Energia, e foi organizada conforme o Apêndice A.

Em complementação aos dados de transporte, se fez necessário informar as distâncias percorridas. Para distâncias terrestres, foi utilizado como fonte o Google Maps. Para distâncias marítimas, foi utilizado o *Marine Traffic* (2020), que fornece dados sobre tráfego marítimo e valores referentes a distância entre portos em milhas náuticas (nm).

São desconhecidos os valores exatos do peso de cada componente específico do painel. Por isso, utilizou-se do estudo elaborados por Miranda (2019) como referência para o cálculo da porcentagem da composição do sistema, como demonstrado na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Massa dos componentes quanto a porcentagem

UNIDADE FUNCIONAL: instalação com 228 painéis, 22,5kg cada					
Componente	Quantitativo	%	Peso (kg) unidade	Peso Total (kg) = unidade x 228	
Célula Fotovoltaica 72 cél x 228 = 16416 0,156 x 0,156m x 16416 = 399,499776 m ² (≈ 400)	Silício	5 %	1,125	256,5	269,325
	Ribbons	0,25 %	0,05625	12,825	
EVA	2 folhas x 228	7 %	1,575	359,1	
Backsheet	228 folhas	4 %	0,9	205,2	
Vidro temperado 3,2mm	228 folhas	72 %	16,2	3693,6	
Moldura Alumínio	-	10 %	2,25	513	
Caixa de Junção	Diodos	0,5 %	0,1125	25,65	89,775
	polietileno alta densidade	0,5 %	0,1125	25,65	
	228 m conector 4mm ²	0,75 %	0,16875	38,475	
**Painel Fotovoltaico	228	100 %	22,5	5130	
Estrutura Solar Fix	-	-	-	462	
Inversor	1	-	-	75	
**Sistema Instalado	228 painéis + estrutura + inversor	-	-	5667	
Material para incineração	-	-	-	4692	
Alumínio para reciclagem	Moldura do painel e estrutura SolarFix	-	-	975	

Fonte: Elaborado pela autora com fundamentação em Miranda, 2019.

O *software* OpenLCA apresenta-se em inglês, do mesmo modo que os dados de referência das bases, por isso alguns termos foram utilizados de modo idêntico ao identificado no programa. Suas traduções foram discriminadas na Lista de Estrangeirismos.

Realizou-se o download de todas as bases de dados de acesso aberto no website da OpenLCA, disponíveis em versões compatíveis com a do programa, além da base de dados fornecida pela Ecoinvent. Foram analisadas dez bases de dados diferentes. Destas, buscou-se encontrar a mais atualizada e completa, a fim de utilizar de uma mesma fonte de dados, garantindo maior confiabilidade quanto à comparação dos mesmos. Sendo assim, a base de dados da Ecoinvent foi adotada neste estudo.

A base de dados disponibilizada pela Ecoinvent conta com fluxos e processos prontos referentes à produção de painéis fotovoltaicos, assim como inúmeros outros componentes desse sistema. Além disso, devido ao fato de a produção do sistema analisado nesse estudo ser localizada na China, o conhecimento específico de

algumas etapas do processo produtivo foi limitado. Por isso, foram necessárias estimativas para que fosse possível obter-se um cenário de produção do sistema, o que atribuiu incertezas ao estudo. Deste modo, foram elaborados dois cenários para os processos produtivos. Um primeiro cenário utilizando da base de dados para a produção do painel fotovoltaico, e um segundo cenário com estimativas para o detalhamento dos transportes da etapa de produção na China. Quanto aos transportes a partir da fase de importação e em solo brasileiro, os dados são bastante próximos da realidade devido à facilidade proporcionada pelo contato virtual (e-mail e whatsapp) com as empresas envolvidas e o fácil acesso às informações disponíveis *online*.

Mesmo com acesso à base de dados relativamente abrangente, não foram encontrados dados que fundamentassem processos de reciclagem do sistema, nem de materiais específicos. Mesmo para a reciclagem do alumínio, que já é um processo usual no Brasil, não foram encontradas referências que pudessem compor a análise em nenhuma das dez bases de dados disponíveis. Por isso, a fase de gestão do fim de vida, foi elaborada considerando a separação do alumínio, e incluindo-o em etapa prévia à reciclagem, como “sucata de alumínio” (*aluminium scrap*, na base de dados) também em mais dois cenários: incineração e aterro.

Devido a essas circunstâncias, foram criados 4 cenários, conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Representação dos cenários criados.

	Aterro Sanitário	Incineração
Dado importado da base de dados para a produção do painel	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Dados detalhados estimados para a produção do painel	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4

Fonte: elaborado pela autora.

Assim, os processos para a Produção da Estrutura SolarFix (perfis metálicos para instalação dos painéis, produto da Empresa Sonnen Energia) são idênticos em todos os cenários. Do mesmo modo, a elaboração dos cenários para aterros sanitários (1 e 3) e para incineração (2 e 4), também são compostos pelos mesmo elementos, mudando apenas a composição dos dados referentes ao processo produtivo.

Para elaboração da ACV no *software*, primeiramente foram criados os fluxos, nos quais se fez necessário determinar: tipo e referencia quantitativa. Os tipos de fluxos podem ser: fluxo elementar (*Elementary Flow*), produto (*Product*), ou rejeito (*Waste*). De modo geral, em sua maioria, os fluxos tendem a ser do tipo “*Product*”. Por isso, a partir das orientações do Tutorial da OpenLCA (2019), os fluxos foram organizados como demonstrado na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Fluxos

Cenário	<i>Flow name</i>		<i>Flow Tipe</i>	<i>Quantitative Reference</i>
1 e 2	01	Estrutura SolarFix	Product	Mass
	02	Sistema Instalado	Product	Mass
	03	Fim de vida	Product	Mass
3 e 4	01	Módulo Fotovoltaico	Product	Mass
	02	Estrutura SolarFix	Product	Mass
	03	Sistema Instalado	Product	Mass
	04	Fim de vida	Product	Mass

Fonte: elaborado pela autora.

Foram elaboradas simulações prévias com os fluxos de fim de vida como resíduos (*Flow Type: Waste*), porém, nesse caso, algumas informações não aparecem no diagrama do sistema de produto. No caso de fluxos de resíduo (*Waste*), o programa considera que o ciclo se encerra nestes, e então exclui as “saídas” do diagrama de sistema de produto. Por isso, ainda que o programa permita que sejam criados fluxos (*Flow Tipe*) de resíduos (*Waste*), os fluxos de fim de vida foram criados como produto (*Product*) para que aparecessem graficamente no diagrama de sistema de produto (FIGURAS 30-31). Essa decisão foi tomada pois não influencia os resultados quantitativos e permite representação gráfica mais detalhada do diagrama de sistema de produto.

A partir disso, foram elaborados os Processos, que precisam ser vinculados às referências quantitativas (*Quantitative Reference*), as quais, neste caso, referem-se aos fluxos criados anteriormente, como representado pela Tabela 8 a seguir.

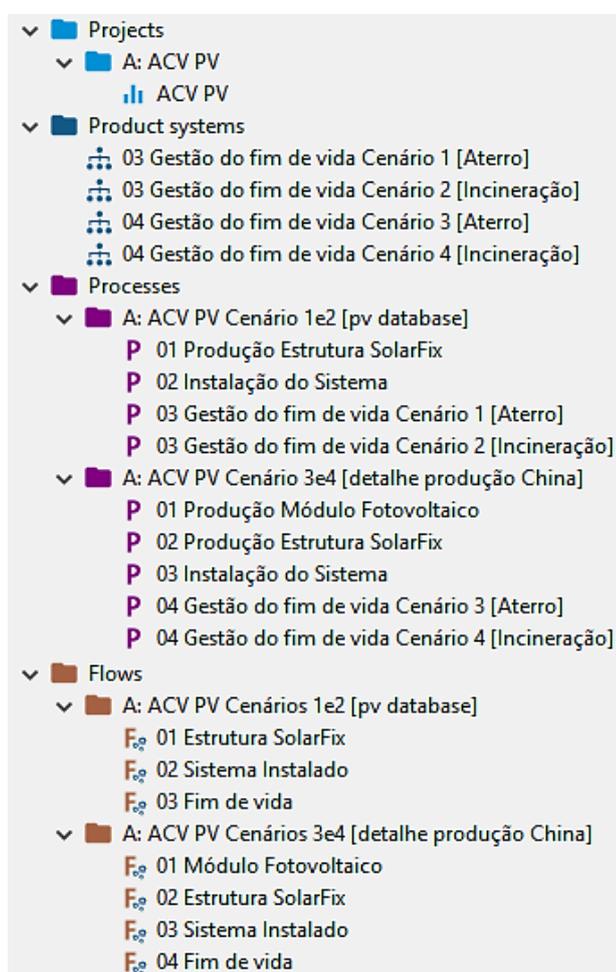
Tabela 8 - Processos

Cenário	Process		Quantitative Reference
1 e 2	01	Produção Estrutura SolarFix	01 Estrutura SolarFix
	02	Instalação do Sistema	02 Sistema Instalado
1	03	Gestão do fim de vida Cenário 1 [Aterro]	03 Fim de vida
2	03	Gestão do fim de vida Cenário 2 [Incineração]	03 Fim de vida
3 e 4	01	Produção Módulo Fotovoltaico	01 Módulo Fotovoltaico
	02	Produção Estrutura SolarFix	02 Estrutura SolarFix
	03	Instalação	03 Sistema Instalado
3	04	Gestão do Fim de vida Cenário 3 [Aterro]	04 Fim de vida
4	04	Gestão do Fim de vida Cenário 4 [Incineração]	04 Fim de vida

Fonte: elaborado pela autora.

Deste modo, no OpenLCA, os fluxos e processos foram representados conforme a Figura 29:

Figura 29 – Representação dos Fluxos e Processos criados no OpenLCA



Fonte: elaborado pela autora.

Os processos são abastecidos e vinculados com os dados das bases de dados. Para sua representação, foram organizados em tabelas de acordo com cada processo, como demonstrado nas Tabelas 9-12.

É importante salientar que as unidades de medida utilizadas estão sujeitas às bases de dados. Ou seja, o fluxo escolhido (*Input Flow*) determina a unidade de medida, e para atender a esta, foram calculadas as devidas equivalências e estimativas.

Para a elaboração do processo de Produção do Módulo Fotovoltaico (TABELA 9) na China, foram estimados meios de transporte e distâncias, a partir de análise das distâncias da fábrica dos módulos ao porto chinês, assim como dos demais componentes que compõem o sistema, a fim de incluir o transporte destes elementos até o deslocamento anterior a chegada na fábrica.

Tabela 9 – Referências e dados quantitativos para a Produção do Módulo Fotovoltaico

Produção do Módulo Fotovoltaico - Cenários 3 e 4				
<i>Input Flows</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>	<i>Provider</i>	<i>Output</i>
2420a: Aluminium primary, ingot	513	kg	CN	5130 kg
2592: anodising, aluminium sheets	20	m ²	RoW	
2732: cable, three conductor cable	38,475	m	GLO	
2610: diode, auxiliaries and energy use	25,65	kg	GLO	
2013: Ethylene vinyl acetate copolymer	359,1	kg	RoW	
2220: extrusion plastic film, RoW (205,2 + 359,1)	564,3	kg	RoW	
2220: injection moulding	25,65	kg	RoW	
2610: photovoltaic cell, multi-Si wafer	450	m ²	RoW	
2013: polyethylene, high density	25,65	kg	RoW	
2013: polyvinylfluoride	205,2	kg	RoW	
2420a: Section bar extrusion	513	kg	RoW	
2310: solar glass, low-iron	3693,6	kg	RoW	
Transport, Freight, Lorry 3,5-7,5 metric ton	5130 * 1000	kg*km	ZA	

Fonte: elaborado pela autora.

Se faz necessário destacar que, quando um mesmo dado de referência for utilizado para dois componentes diferentes dentro de um mesmo processo, soma-se as quantidades. Neste caso, o fluxo “2220: *extrusion plastic film, RoW*”, no processo de Produção do Módulo Fotovoltaico, representa a extrusão do material que compõe o *backsheet*, mas também que compõe o EVA. Por isso, foi inserido apenas uma vez

no processo, com o somatório de quantidades, ou seja: $359,1 + 205,2 = 564,3$.

O fluxo “259: *anodising, aluminium sheets*” utilizado tanto como referência para a produção da moldura de alumínio do painel (TABELA 9) quanto para a produção da estrutura de instalação do sistema (TABELA 10), se refere a folhas de alumínio e é medido em m², dado quantitativo não encontrado nesta pesquisa. Mesmo assim, considera-se importante incluir tal processo, por mínimo que seja, por existir tanto para a moldura do painel, quanto para a produção da estrutura. O valor total do peso do alumínio foi calculado como representado na Tabela 5. Esta estimativa foi fundamentada por referências que sugerem o peso de uma folha de alumínio de 5mm de 13,5 kg/m². Sendo assim, a estimativa de 20m² para ambos processos, é considerada um valor menor do que se espera ser o real, com a intenção de que tal valor incerto não se sobreponha aos valores conhecidos.

Tabela 10 – Referências e dados quantitativos para a Produção da Estrutura SolarFix

Produção da Estrutura SolarFix – todos os cenários				
<i>Input Flows</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>	<i>Provider</i>	<i>Output</i>
2420a: aluminium, primary, ingot	462	kg	IAI Area, South America	462 kg
2592: anodising, aluminium sheets	20	m ²	RoW	
2420a: section bar extrusion, aluminium	462	kg	RoW	
492: transport, freight, lorry 7.5-16 São José dos Pinhais, PR – Santa Maria, RS	462 * 860	kg * km	ZA	

Fonte: elaborado pela autora.

Para a Instalação do Sistema (TABELA 11), as únicas variações quanto aos diferentes cenários, são as entradas referentes aos módulos fotovoltaicos. Nos Cenários 1 e 2, utiliza-se do dado “pronto”, fornecido pela base de dados, e nos Cenários 3 e 4, utiliza-se o processo “01 Produção do Módulo Fotovoltaico”.

Tabela 11 – Referências e dados quantitativos para a Instalação do Sistema

Instalação do Sistema – todos os cenários					
Input Flows		Amount	Unit	Provider	Output
Estrutura SolarFix		462	kg	01 / 02	5667 kg
2790: inverter production, 2,5kW		4	item	RER	
Cenários 1 e 2	261: fotovoltaic panel	450	m ²	RoW	
Cenários 3 e 4	01 Produção do Módulo Fotovoltaico	5130	kg	01	
4923: transport, freight, light comercial vehicle EURO1 Peso de 642 kg dividido/ 6 viagens = 77 kg/viagem Santa Maria - Uruguaiana (390km x 6 = 2340)		77 * 2340	kg * km	ZA	
4923: transport, lorry, freight, 16 t EURO1 Porto Paranaguá – Santa Maria (940km) Porto Paranaguá – Uruguaiana (1200km)		5205 * 2140	kg * km	ZA	
5012: transport, sea, container ship China-Brasil (painéis) (11372,8nm) Alemanha-Brasil (inversor) (5880,6nm)		5,205 * 17253,4	t * nmi	GLO	

Fonte: elaborado pela autora.

Sobre os dados referentes ao inversor, também foram utilizadas aproximações. O modelo utilizado na instalação é de 60Kw e pesa 75kg (SMA SOLAR TECHNOLOGY). Contudo, na base de dados foram encontrados inversores de 0,5, 2,5 e 500 kW. Ao se consultar os dados específicos disponíveis na base de dados, encontra-se que os inversores de 2,5 e 500 kW pesam 18,5 e 3000 kg, respectivamente. Sendo assim, admite-se a melhor aproximação, utilizar o inversor de 2,5 kW, e por ser quantificado em unidades, foram estimadas 4 unidades ($4 \times 18,5 = 74\text{kg}$).

Para a gestão do fim de vida (TABELA 12), todos os cenários incluem a reciclagem do alumínio, mas variam quanto à destinação final do resíduo eletroeletrônico. Os Cenários 1 e 3 referem-se ao aterro sanitário, e os Cenários 2 e 4 referem-se à incineração do resíduo eletroeletrônico. Assim, a partir de pesquisa por usinas de incineração e reciclagem, encontra-se maior incidência na capital, Porto Alegre, localizada em extremos opostos quanto posição geográfica no estado (630km) no qual está localizada a instalação. Por isso, é de extrema importância salientar as variações quanto a transporte de resíduos, afinal, aterros sanitários municipais são comumente localizados mais próximos aos pequenos municípios, quando em comparação a usinas de incineração e reciclagem. Por isso, é válido que seja analisada a comparação destes impactos ambientais.

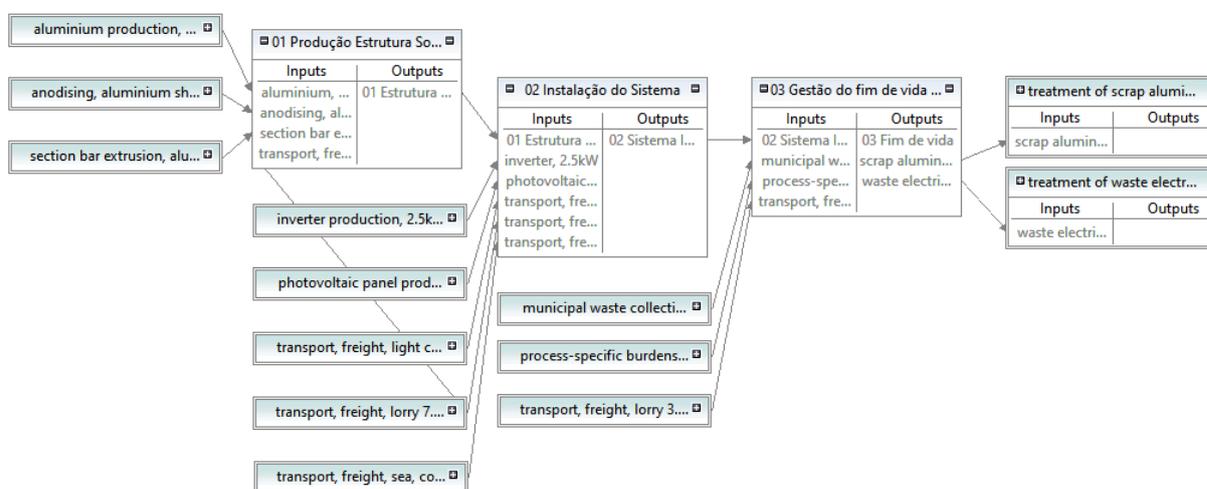
Tabela 12– Referências e dados quantitativos para a Gestão do Fim de Vida

Gestão do Fim de Vida				
Input Flows	Amount		Unit	Provider
	Cenários 1 e 3	Cenários 2 e 4		
Sistema Instalado	5667		kg	-
3811: municipal waste collection servisse by 21 metric ton lorry	4692 * 50	4692 * 630	kg * km	RoW
3821: process-specific burdens, sanitary landfill	4692	-	kg	RoW
3821: process-specific burdens, municipal waste incineration	-	4692	kg	RoW
4923: transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric ton, EURO1 Uruguaiana – Porto Alegre	975 * 630		kg * km	ZA
Output Flows	Amount		Unit	Provider
04 Fim de vida	5667		kg	-
3821: scrap aluminium (waste)	975		kg	RoW
3830: waste electric and electronic equipment (waste)	4692		kg	RoW

Fonte: elaborado pela autora.

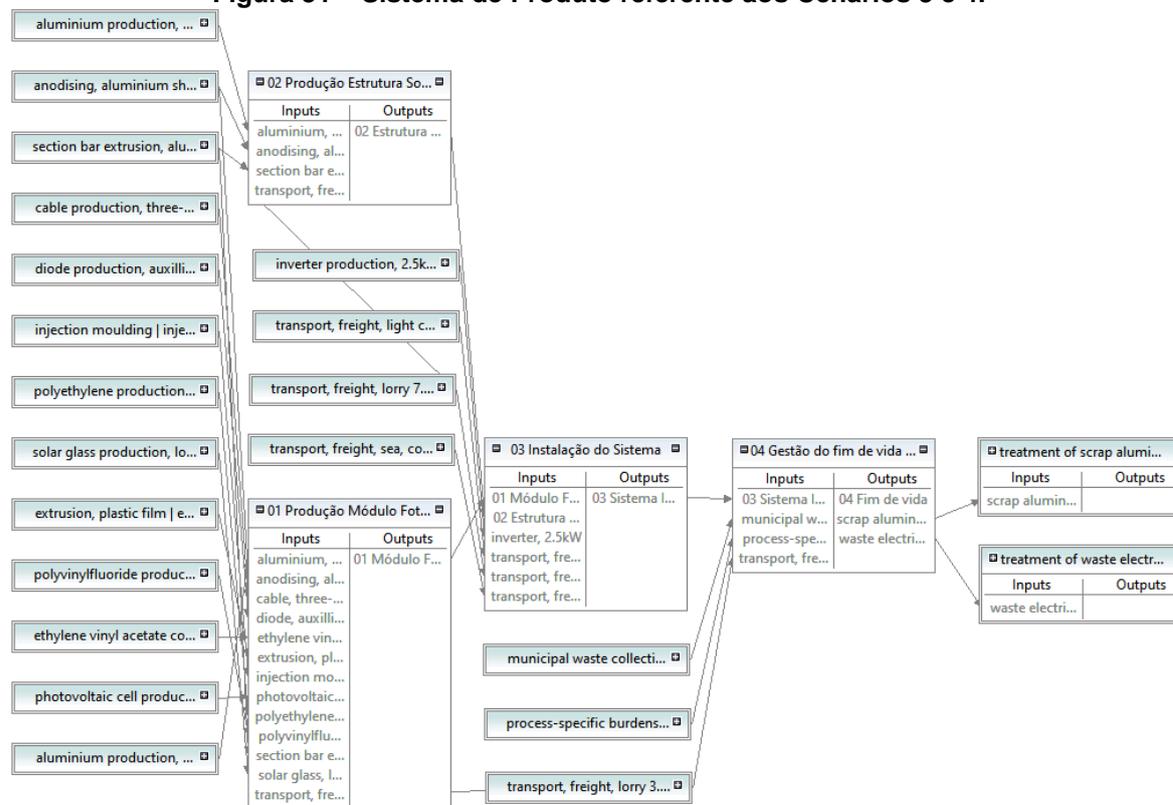
A partir disso, foram selecionados os processos “Fim de vida” em todos os 4 cenários para a elaboração do Sistema de Produto (*Product System*). Os diagramas do Sistemas de Produto são idênticos para os Cenários 1 e 2, assim como para os Cenários 3 e 4, pois os processos que variam entre eles acabam por não ser representados na imagem. Assim, os diagramas de Sistema de Produto resultantes dessa ACV são ilustrados conforme as Figuras 30 e 31 a seguir.

Figura 30 – Sistema de Produto referente aos Cenários 1 e 2.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 31 – Sistema de Produto referente aos Cenários 3 e 4.



Fonte: elaborado pela autora.

Guimarães (2018) discute acerca das incertezas em ACV fundamentada por Huijbregts (1998) e ratifica que são incertezas de Parâmetro, aquelas ocasionadas por dados completamente desconhecidos, e incertezas de Modelo, aquelas que têm origem em simplificações causadas por dificuldades encontradas na modelagem do sistema. Quanto às incertezas orientadas por Huijbregts (1998) cabíveis nesta pesquisa, podem ser discutidas especificamente:

- Incerteza de Parâmetro: todos os dados desconhecidos demandados para a elaboração da ACV foram estimados a partir de fundamentação teórica, ou seja, ainda que completamente desconhecidos, puderam ser estimados de modo válido;
- Incerteza de Modelo: podem ser incertezas de modelo nesta pesquisa, a escolha pelo aproveitamento dos dados fornecidos pela base de dados. Neste caso, refere-se em específico, à diferença entre os dois primeiros cenários onde foi utilizado o dado “pronto”, e os dois últimos cenários, dependentes de estimativas para o detalhamento do processo, respectivamente. As incertezas causadas por simplificações podem ser encontradas com maior incidência nos Cenários 1 e 2, e por dificuldades de

modelagem, que demandaram mais estimativas, nos Cenários 3 e 4;

- Incertezas de Cenário: quanto às incertezas de cenário, como as escolhas de unidade funcional, alocação, limites do sistema, horizonte temporal e nível tecnológico, são consideradas razoáveis, afinal, dependem de decisões de modelagem do sistema, e por isso, podem variar em qualquer ACV.

Quanto às variabilidades espacial, temporal e entre fontes e objetos orientadas por Huijbregts (1998), nesta pesquisa, todas estão condicionadas às informações fornecidas pelas bases de dados. Em específico à variabilidade espacial, encontra-se diretamente relacionada aos provedores (*providers*) dos processos no sistema que orientam quanto a localização. Essa identificação quanto à região geográfica, ainda que de modo bastante generalista, por vezes permite determinar alguns países (como China, por exemplo), mas de modo geral, localiza os processos por continente (principalmente América, Ásia, Europa).

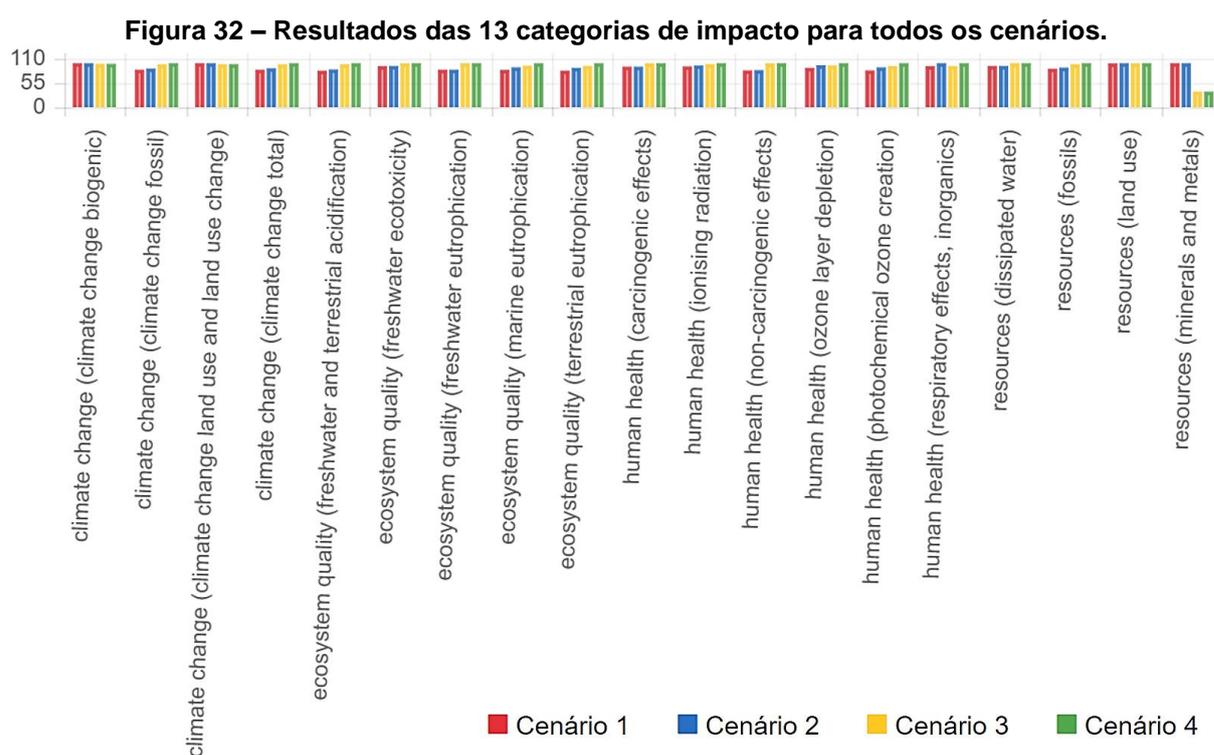
Sendo assim, a partir dos sistemas de produto resultantes, e desta análise quanto aos dados utilizados, pode-se dar sequência a avaliação dos resultados. Deste modo, a seguir, o item 3.3 apresenta os resultados encontrados, e o item 4, sua interpretação.

3.3 Avaliação dos Impactos

Após a elaboração dos Sistemas de Produto apresentados anteriormente (FIGURAS 30 e 31), foram realizados os cálculos no OpenLCA. Para obter os resultados de impacto ambiental, foi utilizado um método do cálculo aberto, disponibilizado pela plataforma da OpenLCA (OPENLCA NEXUS, 2020), compatível com a versão openLCA 1.8, no caso, a base “ecoinvent 3.5 LCIA methods”. Nessa base, o método mais recente disponível é o ILCD 2.0 2018, que engloba 19 categorias de impacto.

Foram simulados resultados prévios, a fim de identificar falhas ou imprecisões, compreender a organização do sistema de produto como um todo e organizá-lo da melhor forma possível. Quanto maior o detalhamento dos dados coletados, maior a proximidade dos resultados de cada cenário. Ou seja, conforme se atribuíam mais dados e informações aos processos, menores os contrastes entre cenários.

Por fim, os resultados encontrados são apresentados nesta sessão (3.3). A Figura 32 representa o resultado final gráfico do relatório gerado pelo *software*, e a Figura 33, os resultados quantitativos para as categorias de impacto em cada cenário.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 33 – Resultados quantitativos das categorias de impacto para todos os cenários.

Impact category	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Unit
climate change (climate change biogenic)	7.49363e+2	7.49799e+2	7.35934e+2	7.36370e+2	kg CO2-Eq
climate change (climate change fossil)	1.04244e+5	1.07712e+5	1.18962e+5	1.22430e+5	kg CO2-Eq
climate change (climate change land use and land use change)	3.14730e+2	3.15042e+2	3.07314e+2	3.07626e+2	kg CO2-Eq
climate change (climate change total)	1.05308e+5	1.08777e+5	1.20005e+5	1.23474e+5	kg CO2-Eq
ecosystem quality (freshwater and terrestrial acidification)	6.55263e+2	6.78330e+2	7.66689e+2	7.89756e+2	mol H+-Eq
ecosystem quality (freshwater ecotoxicity)	1.06608e+5	1.07389e+5	1.14091e+5	1.14872e+5	CTU
ecosystem quality (freshwater eutrophication)	5.30409e+1	5.31123e+1	6.21278e+1	6.21992e+1	kg P-Eq
ecosystem quality (marine eutrophication)	1.39421e+2	1.48761e+2	1.55428e+2	1.64767e+2	kg N-Eq
ecosystem quality (terrestrial eutrophication)	1.30932e+3	1.41224e+3	1.47498e+3	1.57790e+3	mol N-Eq
human health (carcinogenic effects)	2.65148e-3	2.66113e-3	2.87617e-3	2.88583e-3	CTUh
human health (ionising radiation)	9.65286e+3	9.86502e+3	1.01947e+4	1.04068e+4	kg U235-Eq
human health (non-carcinogenic effects)	2.76839e-2	2.78821e-2	3.28853e-2	3.30835e-2	CTUh
human health (ozone layer depletion)	1.21640e-2	1.29205e-2	1.28550e-2	1.36115e-2	kg CFC-11-Eq
human health (photochemical ozone creation)	4.45091e+2	4.80797e+2	4.97305e+2	5.33010e+2	kg NMVOC-Eq
human health (respiratory effects, inorganics)	6.61456e-3	7.09002e-3	6.60411e-3	7.07957e-3	disease incidence
resources (dissipated water)	1.68379e+5	1.68545e+5	1.80128e+5	1.80294e+5	m3 water-Eq
resources (fossils)	1.56354e+6	1.61029e+6	1.74703e+6	1.79378e+6	MJ
resources (land use)	7.27304e+5	7.31980e+5	7.28820e+5	7.33496e+5	points
resources (minerals and metals)	5.02946e-4	5.03384e-4	1.78022e-4	1.78460e-4	kg Sb-Eq

Fonte: elaborado pela autora.

Como resultado, o programa apresenta um gráfico para cada categoria de impacto com os quatro cenários, ou seja, os resumos dos resultados de impacto de todos os cenários, que são os gráficos em cinza (FIGURAS 35, 37, 39, 41, 42). Já os gráficos em cores (FIGURAS 36, 38, 40, 43, 44, 45), apresentam resultados mais detalhados dos processos em cada categoria de impacto para cada cenário. Considerando que são 4 cenários e 19 categorias, o resultado pode se desenvolver em até 95 gráficos (19 x 4 resultados específicos de cada cenário + 19 resultados gerais de cada categoria) referentes às categorias de impacto. A fim de desenvolver a análise de modo objetivo, são apresentados apenas os resultados mais expressivos para fundamentar a discussão.

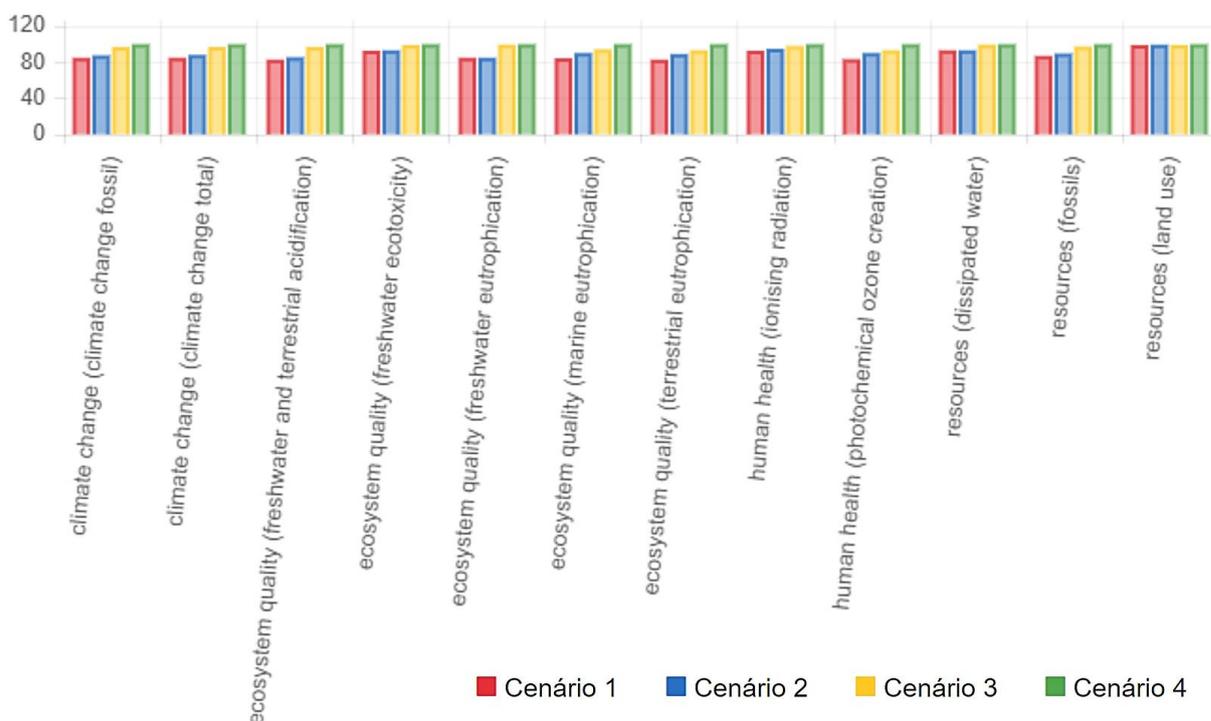
Como concluído na revisão bibliográfica, esta seção explora as categorias de impacto mais abordadas pelos estudos de referência (acidificação e eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade). A categoria de mudanças climáticas totais também é analisada nesta seção por ser bastante representativa, ainda que não esteja entre as mais discutidas pelos estudos na revisão bibliográfica. Além destas, também se discute uma das categorias que representa exceção (mudanças climáticas por uso e transformação do solo) ao padrão da maioria dos resultados.

Uma análise geral permitiu perceber que a maioria dos resultados das categorias de impacto, resultam no Cenário 4 como o de maior impacto e o Cenário 1 como o de menor impacto. Desta forma, das 19 categorias de impacto, apenas quatro são exceção a esse padrão: mudanças climáticas biogênicas, mudanças climáticas por uso e transformação do solo, agentes inorgânicos respiratórios e depleção de recursos metais e minerais.

Além disso, pôde-se perceber que categorias como: depleção de recursos metais e minerais, agentes cancerígenos e não-cancerígenos, substâncias inorgânicas respiratórias e depleção da camada de ozônio, representam valores decimais, e por isso, considerados muito pequenos quando comparados à maioria dos resultados. Sendo assim, estas cinco categorias não são apresentadas em forma de gráfico nem discutidas de modo aprofundado nesta seção.

A partir disso, os resultados mais representativos podem ser considerados conforme a Figura 34 a seguir.

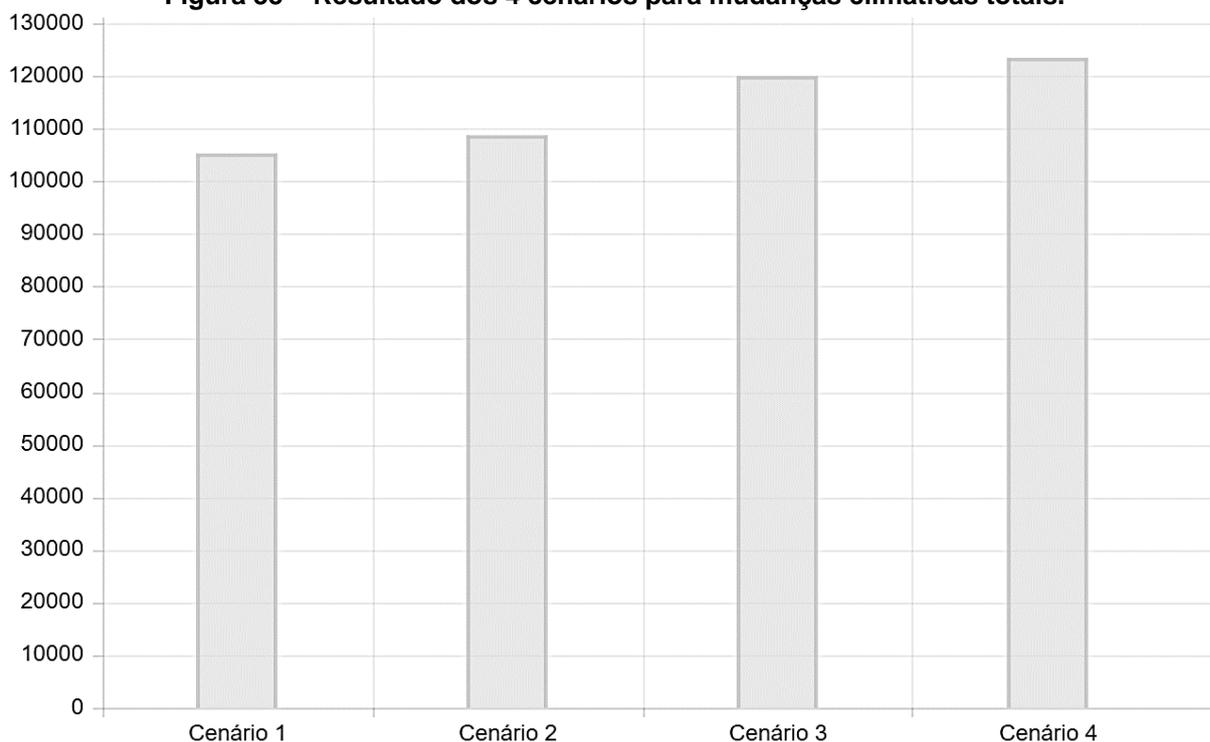
Figura 34 – Resultados das categorias de impacto mais representativas.



Fonte: elaborado pela autora.

As Figuras 32-34 permitem concluir que para a maioria das categorias de impacto (15 das 19), os cenários de incineração (2 e 4) tendem a causar maiores impactos que os cenários de aterro sanitário (1 e 3). Além disso, a partir de análise mais detalhada na Figura 34, pode-se perceber claramente que nos cenários (3 e 4), nos quais o processo produtivo do painel fotovoltaico foi elaborado com mais detalhes, os resultados de impacto representam maiores valores.

A análise da categoria de mudanças climáticas totais (FIGURA 35) é bastante representativa pois ilustra alguns padrões que se repetem na maioria das categorias de impacto. O impacto ambiental total é maior nos Cenários 1 e 2, do que nos cenários 3 e 4. Além disso, os cenários referentes ao fim de vida em incineração (2 e 4), representam maiores impactos do que os cenários de aterro sanitário (1 e 3).

Figura 35 – Resultado dos 4 cenários para mudanças climáticas totais.

Fonte: elaborado pela autora.

Ainda seguindo certo padrão, a produção do painel fotovoltaico (Cenários 1 e 2) e da célula fotovoltaica (Cenários 3 e 4), apresentam os maiores valores de modo bastante contrastante. Nesta categoria (FIGURA 36), percebe-se outros elementos bastante relevantes, como a produção do alumínio primário em todos os cenários, os transportes terrestres nos dois primeiros cenários, e a produção do vidro solar e dos diodos nos dois últimos cenários. Deste modo, fica evidente, que os processos produtivos e os transportes terrestres são bastante representativos quanto às mudanças climáticas totais.

Ainda que os resultados entre os cenários 1 e 2, e os cenários 3 e 4 sejam muito semelhantes, são apresentados todos os gráficos para demonstrar que existem pequenas variações de impacto quando a gestão do fim de vida.

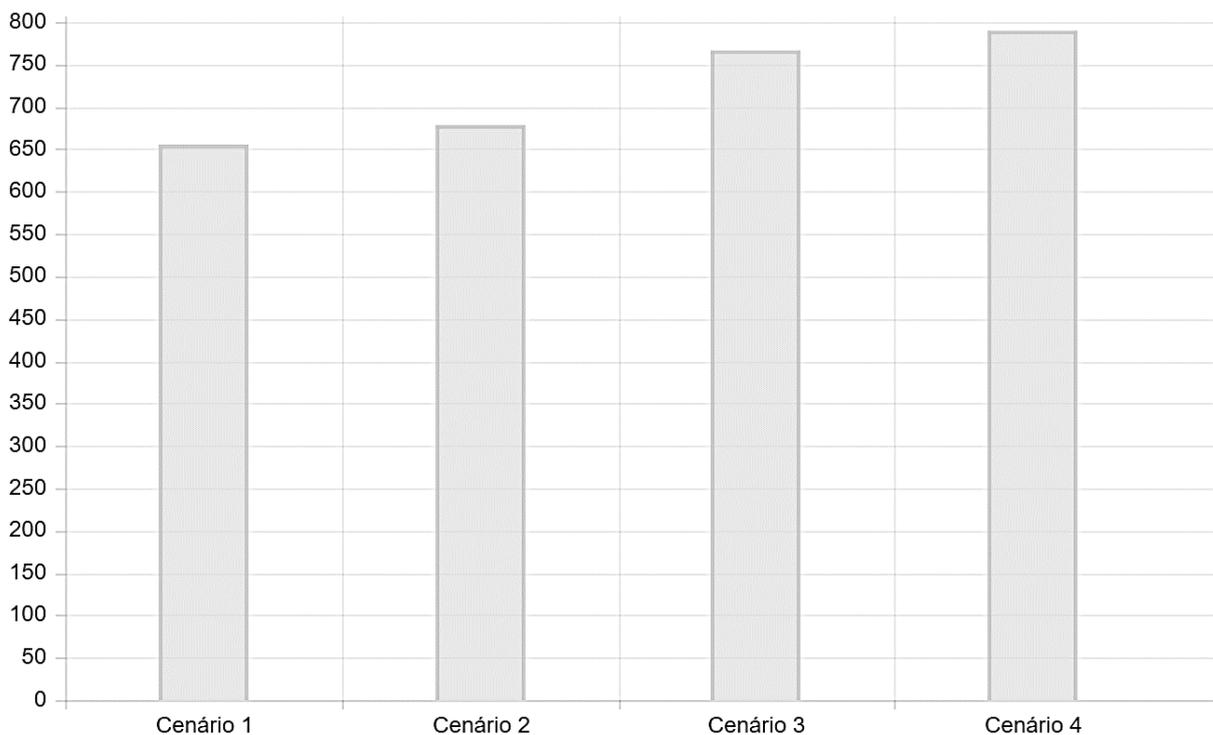
Figura 36 – Resultado para mudanças climáticas totais nos Cenários 1-4, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora.

A categoria de impacto de acidificação terrestre e de água doce (FIGURA 37) é uma das mais discutidas nos estudos analisados, e segue o padrão da maioria dos resultados pois mostra os Cenários 3 e 4 com maiores impactos do que os Cenários 1 e 2, assim como, os cenários de incineração (2 e 4) continuam representando maiores impactos que os de aterro sanitário (1 e 3).

Figura 37 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto a acidificação terrestre e de água doce.



Fonte: elaborado pela autora.

Conforme a Figura 37, quanto à acidificação, o Cenário 4 apresenta o maior impacto. Considerando o contraste para o Cenário 3, pode-se concluir que os processos de incineração e transporte desse rejeito são os que mais contribuem para tal variação.

Quanto aos transportes, na categoria de acidificação terrestre e de água doce, pode-se perceber que o transporte marítimo representa maiores impactos que os demais transportes, como representado pela Figura 38 a seguir.

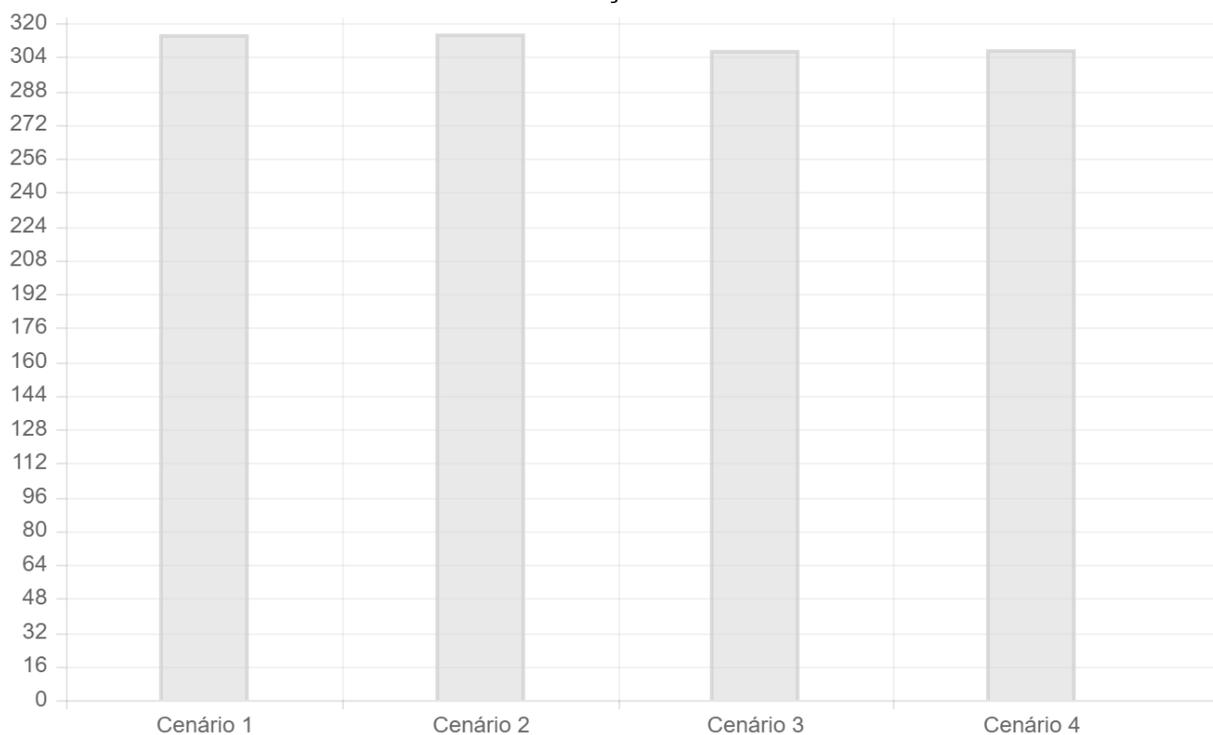
Figura 38 – Resultado para qualidade do ecossistema quanto a acidificação terrestre e de água doce nos Cenários 1-4, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora.

A partir de análise geral dos gráficos, pôde-se perceber que para todas as categorias de impacto em todos os cenários, os processos de produção do painel fotovoltaico (Cenários 1 e 2) e produção da célula fotovoltaica (Cenários 3 e 4) estão sempre em primeiro lugar quanto aos maiores impactos. A única exceção é a categoria de impacto de mudanças climáticas quanto ao uso e transformação do solo (FIGURAS 38 e 39).

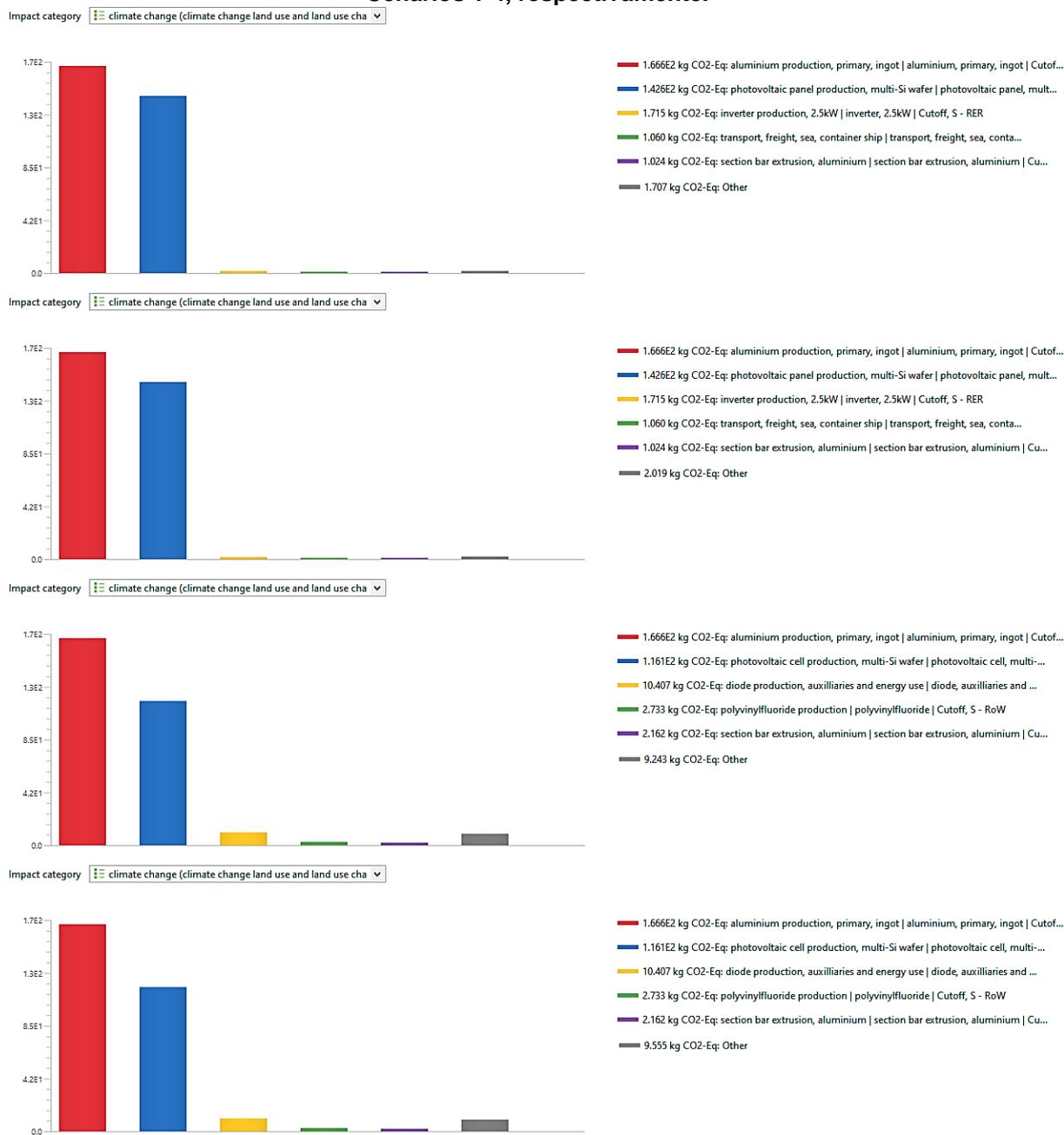
Figura 39 – Resultado dos 4 cenários para mudanças climáticas quanto ao uso e transformação do solo.



Fonte: elaborado pela autora.

Como representado na Figura 40 a seguir, nos quatro cenários, a produção primária do alumínio se sobrepõe a produção do painel fotovoltaico e da célula. Ao buscar a referência desse processo no software, encontrou-se que o processo que causa o maior impacto nesse caso, é a produção do alumínio primário situada na América do Sul (*provider IAI Area - South America*). Ou seja, para esta categoria de impacto, o processo produtivo do alumínio primário na América do Sul para a estrutura da instalação (SolarFix) causa maior impacto que o processo produtivo do painel e da célula fotovoltaica, assim como do alumínio primário produzido na China para a moldura do painel.

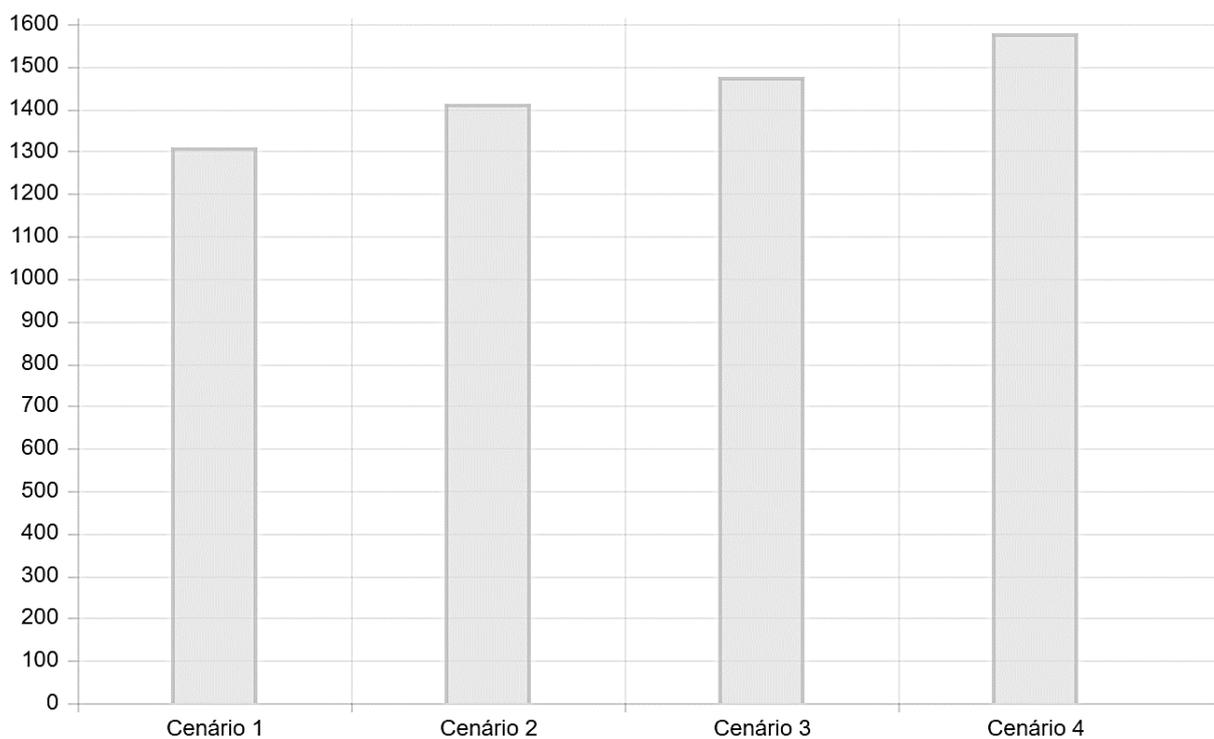
Figura 40 – Resultado para mudanças climáticas quanto ao uso e transformação do solo nos Cenários 1-4, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora.

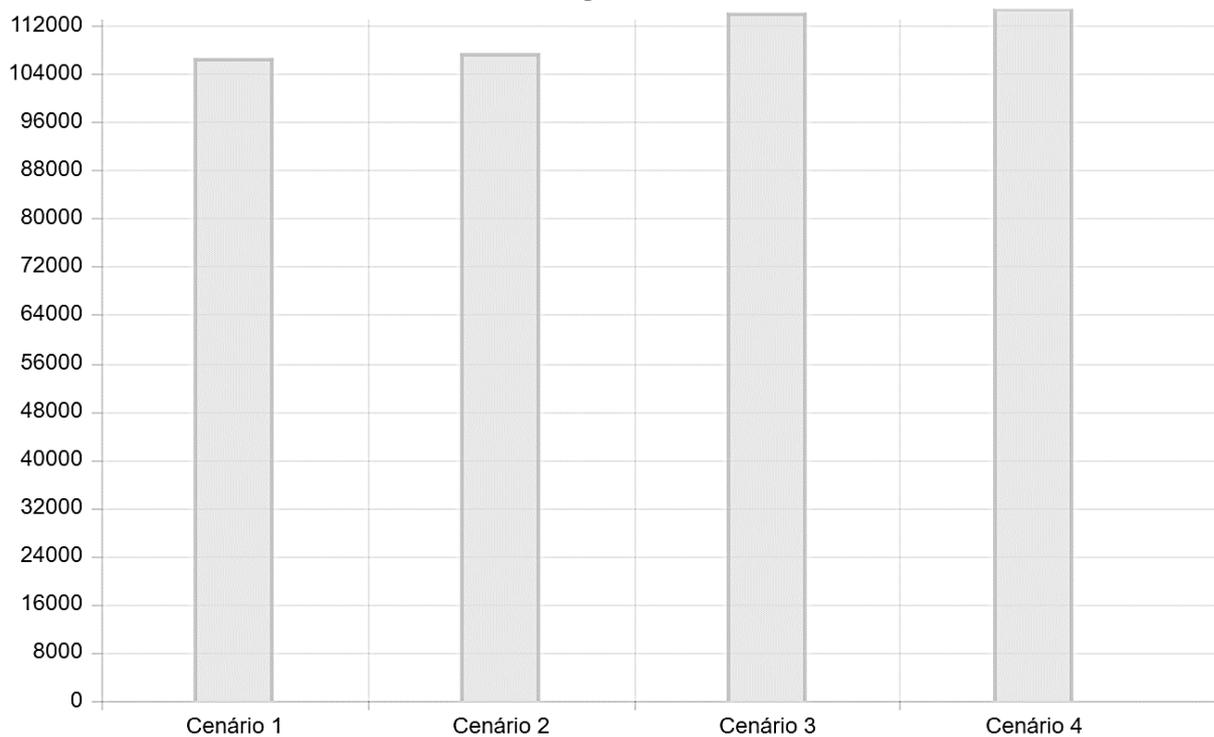
O método de cálculo fornece resultados distintos para eutrofização terrestre, marinha e de água doce. Os resultados para essas três categorias demonstram proporções semelhantes quanto aos diferentes cenários e seguem o mesmo padrão da maioria. Por isso, apresenta-se o gráfico de eutrofização terrestre, conforme Figura 41. A categoria de ecotoxicidade de água doce também é uma das categorias mais discutidas pelos estudos apresentados e está representada na Figura 42 a seguir.

Figura 41 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto a eutrofização terrestre.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 42 – Resultado dos 4 cenários para qualidade do ecossistema quanto à ecotoxicidade de água doce.



Fonte: elaborado pela autora.

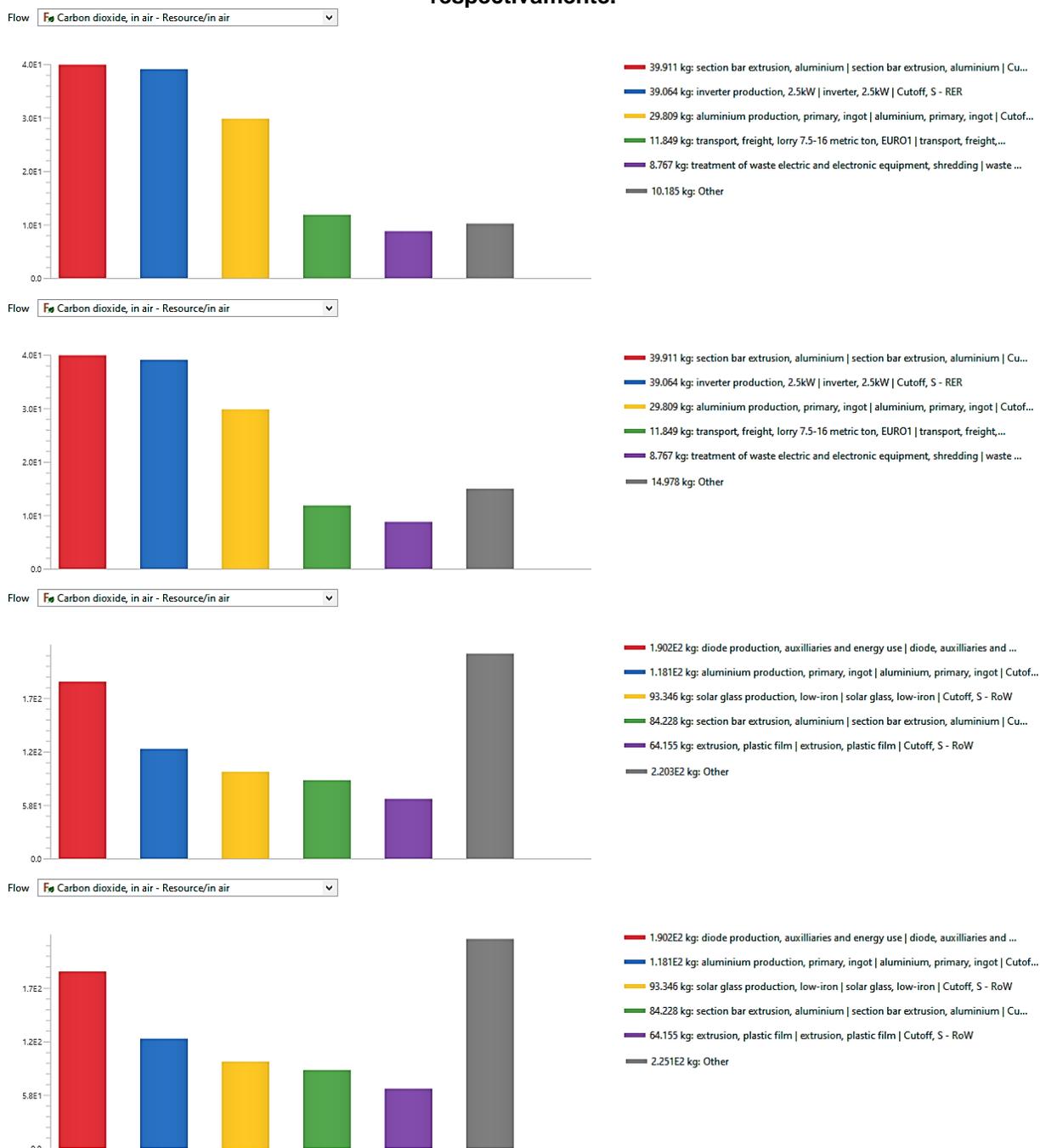
Além dos resultados para cada uma das 19 categorias de impacto, o programa também apresenta resultados específicos referentes à contribuição de componentes nos processos. Não foi encontrado valor exato de quantos componentes o método de cálculo analisa, portanto, decidiu-se por abordar apenas as emissões de dióxido de carbono (CO₂), por ser o principal componente relacionado ao impacto ambiental por mudanças climáticas, como concluído na revisão bibliográfica.

No OpenLCA, não foi possível identificar de modo específico quais processos incluem a barra de “outros” (cinza) nos gráficos específicos de cada cenário. Considerando os resultados expressivos para a produção do painel fotovoltaico (2610: *photovoltaic panel, multi-Si wafer*) nos cenários 1 e 2, e da célula fotovoltaica (2610: *photovoltaic cell, multi-Si wafer*) nos cenários 3 e 4, foi elaborada uma simulação excluindo esses processos, buscando visualizar quais outros processos são os maiores responsáveis pela emissão de CO₂, como representado na Figura 43.

De modo geral, os processos produtivos são os que mais contribuem nesse caso. Destaca-se a produção e extrusão do alumínio, produção dos diodos, do inversor e do vidro solar. E com relação aos transportes, o transporte terrestre é o único que aparece entre os cinco processos que mais contribuem para a emissão de CO₂.

Além disso, vale destacar que o processo de tratamento dos resíduos elétricos e eletrônicos é o único dos processos referentes à gestão do fim de vida que aparece entre os cinco mais poluentes, como representado pela Figura 43 a seguir.

Figura 43 – Resultados para contribuição de dióxido de carbono no ar nos Cenários 1-4, respectivamente.



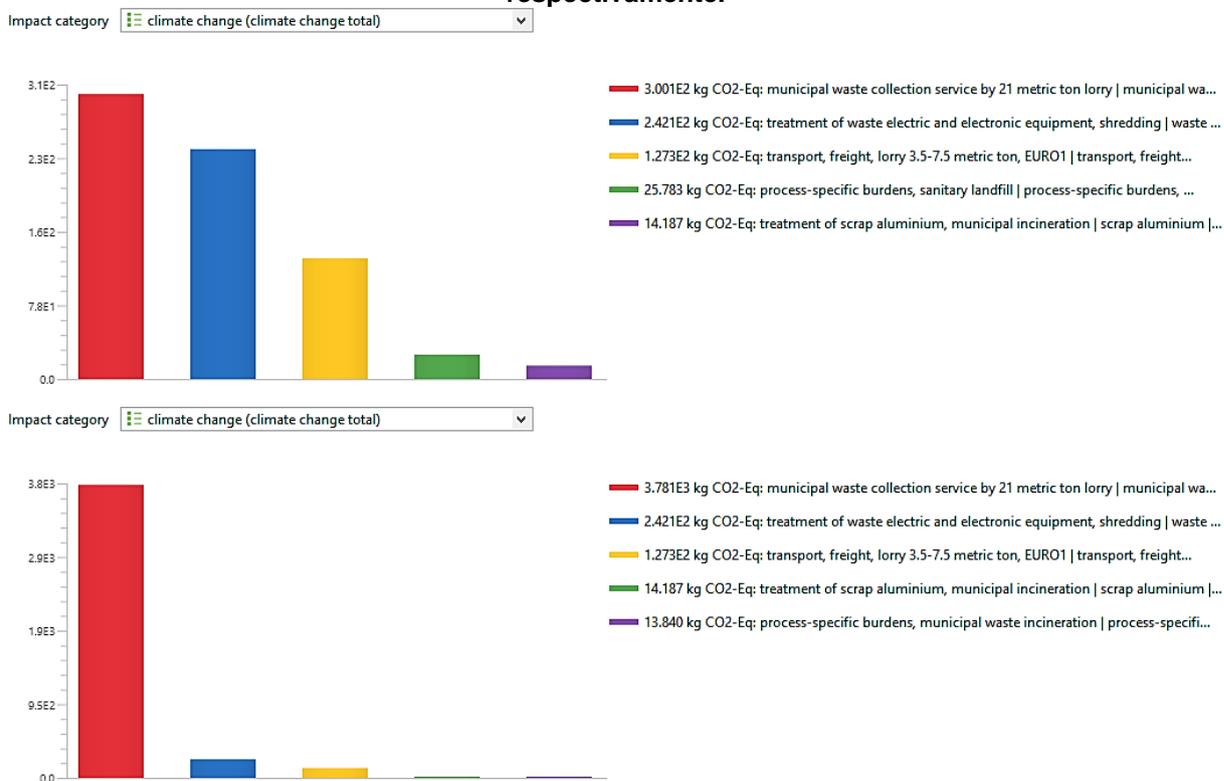
Fonte: elaborado pela autora.

Nessa simulação, foram analisados os resultados de todas as categorias de impacto para todos os cenários. Mesmo a partir dessas simulações, não foi possível identificar qual das duas alternativas de fim de vida causa o maior impacto. Para isso, foi elaborado um sistema de produto incluindo apenas o processo de fim de vida, no qual foi possível observar a hierarquia do impacto ambiental dos processos incluídos nessa

etapa. São apresentados apenas dois gráficos para cada resultado pois entre os quatro cenários, os resultados variaram apenas entre situação e aterro sanitário e incineração, ou seja, Cenários 1 e 3 apresentaram resultados idênticos, assim como os Cenários 2 e 4.

A Figura 44 a seguir, representa o resultado para a categoria de mudanças climáticas totais nesta situação. Pôde-se perceber que os três processos de maior impacto se mantêm os mesmos em todos os cenários: coleta municipal de resíduos, gestão de resíduos elétricos e eletrônicos por trituração, transporte terrestre (atribuído ao resíduo a ser reciclado), respectivamente. Além disso, percebe-se que o aterro sanitário apresenta resultados de impacto maiores que a incineração. Ou seja, nos gráficos gerais de comparação dos cenários, nos quais a incineração causa maiores impactos, isto é justificado pelo aumento das distâncias a serem percorridas, e não pela comparação entre os processos (aterro e incineração) em si.

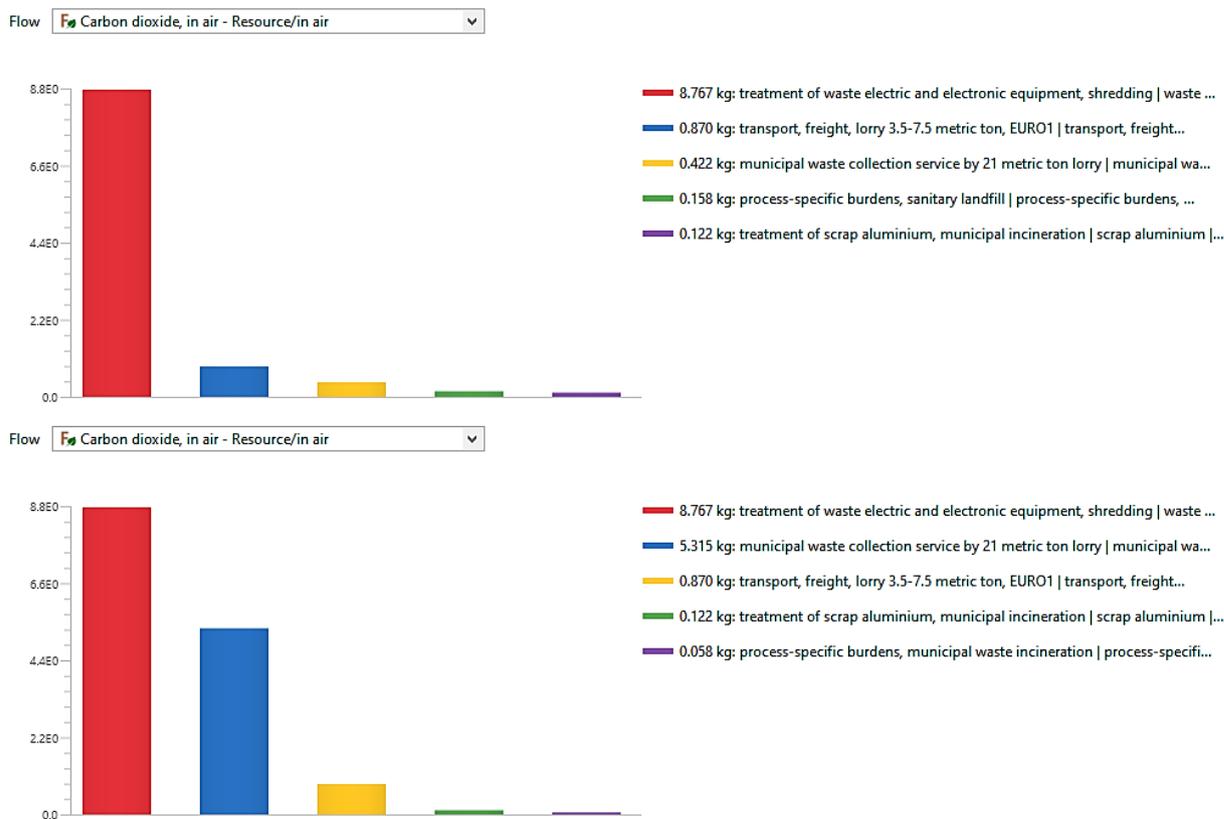
Figura 44 – Resultados para mudanças climáticas totais nos Cenários 1-2 e 3-4, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora.

Quanto à contribuição à emissão de CO₂ ao ar nas situações de fim de vida (FIGURA 45), pôde-se perceber que a gestão dos resíduos elétricos e eletrônicos é o processo de maior contribuição. Nos cenários de incineração, o processo de coleta municipal de resíduos representa maiores impactos que o processo de transporte do resíduo a ser reciclado. Por fim, pôde-se perceber, que os valores para o impacto ambiental de aterro sanitário municipal, são maiores que para incineração. Ou seja, o processo de incineração e modo isolado, causa menores impactos ambientais do que a destinação a aterro sanitário. Entretanto, nesse estudo de caso, para que a incineração ocorra, se faz necessário maior percurso de transporte, o que aumenta os valores de emissão e CO₂ (FIGURA 45) nos cenários de incineração (2 e 4), assim como o impacto ambiental na categoria de mudanças climáticas totais (FIGURA 44).

Figura 45 – Resultados para contribuição de dióxido de carbono no ar nos Cenários 1-2 e 3-4, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora.

4 DISCUSSÃO: INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Alguns padrões puderam ser observados quanto aos resultados referentes às 19 categorias de impacto:

- a produção do painel nos Cenários 1 e 2, e a produção da célula nos Cenários 3 e 4, são os processos que causam os maiores impactos em todos os cenários e em todas as categorias. A única exceção é a categoria de impacto de mudança climática de uso e transformação do solo, na qual o maior impacto resultante é a produção do alumínio primário para todos os cenários.
- os Cenários 1 e 2 representam os menores impactos e os cenários 3 e 4 os maiores, na maioria das categorias. As exceções são mudanças climáticas biogênicas, mudança climática de uso e transformação do solo, efeitos inorgânicos respiratórios e depleção de recursos metais e minerais, nas quais os cenários 1 e 2 são maiores que os 3 e 4, ainda que os cenários de incineração (2 e 4) representem maiores impactos que os cenários de aterro (1 e 3).
- os Cenários de incineração (2 e 4) sempre apresentam os maiores impactos quando comparados aos Cenários de aterro (1 e 3), sem exceções. Isso é justificado principalmente pelo aumento da distância a ser percorrida nos cenários de incineração, como foi demonstrado pela análise específica da gestão do fim de vida.

Considerando que na maioria dos casos, os Cenários 1 e 3, apresentam valores de impacto menores que os Cenários 2 e 4, conclui-se que, neste caso, tratar do resíduo em aterro, causa menores impactos ambientais do que o tratamento por incineração, ao se considerar todos os processos que incluem a gestão do fim de vida, afinal, também são incluídas maiores distâncias a serem percorridas pelos meios de transporte, além das emissões causadas pelo processo de incineração em si. Entretanto, a análise dos processos de aterro e incineração isolados, mostram que o processo de incineração causa menores impactos. Ou seja, neste caso, os processos de transporte impactam diretamente no resultado final, ratificando a importância da análise do ciclo de vida como todo. Sendo assim, é possível considerar que a escolha por processos de gestão de fim de vida localizados próximos geograficamente, de modo geral, tende a ser benéfica quanto ao impacto ambiental.

Percebe-se que a modelagem da etapa com detalhamento dos processos, representa impactos ambientais mais significativos ao uso dos dados “prontos” da base. Deste modo, a partir desse resultado, fica evidente que a diferença se encontra na variação das escolhas de modelagem do processo produtivo do painel. Ou seja, o uso do dado “*photovoltaic panel production*” (produção de painel fotovoltaico) nos Cenários 1 e 2 em oposição ao detalhamento do processo produtivo do painel nos Cenários 3 e 4, demonstra que o segundo inclui elementos desconhecidos ou negligenciados na primeira alternativa. Assim, pode-se concluir que criar processos detalhados para a ACV a partir de fluxos elementares das bases de dados tendem a apresentar resultados mais detalhados, e neste caso, maiores valores de impacto ambiental.

Quanto à validade das bases de dados utilizadas, pode-se considerar bastante generalista a relação dos dados e a localização geográfica dos processos. Alguns processos disponíveis nas bases de dados contam com abordagens continentais, mas em sua maioria, segregam dados europeus do “resto do mundo” (*RoW*). Ou seja, para os processos produtivos localizados na China, utiliza-se dos fornecedores *RoW* (*rest-of-the-world*), e se caso essa produção fosse situada no Brasil, seria utilizado o mesmo fornecedor (*Provider*). Ou seja, no OpenLCA com a base de dados utilizada, em alguns processos, os impactos atribuídos à produção chinesa são os mesmos para a brasileira, e nesse caso, a única variação é a inclusão do transporte marítimo.

Considerando-se as distâncias entre a instalação e usinas de reciclagem de alumínio ou incineração do resíduo eletrônico mais próximas, acredita-se que por motivos culturais, dificilmente, esse resíduo encontrará destinação diferente dos aterros sanitários. Porém, considerando que o sistema representa uma instalação realizada neste ano de 2020, e esperando que seja substituído ou descartado em 25 anos como demonstram a maioria dos estudos de caso, espera-se que em 2045 já sejam mais comuns as ações de reciclagem para a gestão de resíduos eletroeletrônicos.

Deste modo, independentemente do cenário, os processos produtivos sempre causam impactos mais significativos que os processos de reciclagem. Isso é percebido devido ao fato de que nenhum dos processos de incineração ou aterro sanitário aparecer entre os processos de impacto mais relevante nos gráficos específicos. Ou seja, a gestão do fim de vida desses sistemas não causa impacto ambiental tão relevante quanto os processos produtivos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica, fica evidente a demanda pela gestão de resíduos fotovoltaicos em um futuro próximo no Brasil justificado, principalmente, pelo aumento exponencial da capacidade instalada de sistemas de geração de energia solar nos últimos anos. Por isso, há certa expectativa quanto ao atendimento dos princípios propostos pelo Acordo Setorial para a gestão dos resíduos eletroeletrônicos.

Considerando o Acordo Setorial para a gestão de eletroeletrônicos, aliado às informações coletadas pela revisão bibliográfica, foi possível perceber a complexidade da separação dos materiais laminados no painel fotovoltaico, demonstrando que, dificilmente, serão separados e reciclados, considerando as atuais alternativas de gestão de resíduos e tecnologia disponíveis no Brasil. Por isso, identificou-se que uma estratégia possível para a gestão deste tipo de resíduos no Brasil é a separação e reciclagem das peças de alumínio, que dependem, principalmente, de desmontagem manual, aliada à incineração ou ao aterro dos demais componentes eletrônicos.

Conclui-se que, a partir das atuais tecnologias disponíveis para gestão de resíduos eletroeletrônicos no Brasil, a separação do alumínio e reciclagem do mesmo, tem grandes chances de ser garantida, considerando o cenário nacional de reciclagem de alumínio. Porém, a reciclagem dos demais componentes demanda processos complexos de separação não tão acessíveis e, por isso, tendem a ser incinerados e/ou depositados em aterros.

Para se elaborar a ACV de um produto, almejando os dados mais precisos possíveis, precisa-se de acesso a conhecimento detalhado acerca de todos os processos que envolvem esse produto e pesquisa investigativa. Assim, por ser composto de diferentes agentes ao longo de seu ciclo de vida, a análise torna-se bastante complexa, e conhecer todos esses processos pode-se considerar um ideal inatingível.

De modo geral, uma das principais dificuldades de se elaborar uma ACV pode ser considerada a falta de dados e o contato com os diversos profissionais que poderiam fornecê-los. Nesta pesquisa, fica evidente que muitos dos dados necessários para abastecer o *software* não são conhecidos, sendo necessárias muitas estimativas, impactando na imprecisão dos resultados. Essa dificuldade de acesso aos dados, não

é causada apenas pela dificuldade de contato, mas, na maioria dos casos, mesmo as empresas responsáveis pelo produto não têm controle sobre tais informações como, por exemplo, o tipo exato de transporte terrestre, ou o peso das peças produzidas. Sendo assim, mesmo havendo contato direto com as empresas responsáveis por produção e instalação de cada um dos elementos do sistema, ainda assim, alguns dados precisam ser estimados.

Por isso, uma das principais limitações da pesquisa diz respeito à imprecisão de dados coletados. Informações acerca dos processos produtivos e transportes de alguns materiais em outros países foram determinadas por meio de estimativas e de modo relativamente generalista. Isto se deve principalmente à dificuldade de se obter dados quantitativos exatos diretamente nas fábricas de cada material, principalmente, quando estrangeiras.

Entretanto, quando os dados demandaram contato com empresas brasileiras e representantes dispostos à vinculação com a pesquisa, pôde-se garantir maior precisão, aferindo maior credibilidade aos resultados. Sendo assim, pôde-se entender com clareza as variações quanto à exatidão dos dados em diferentes etapas do ciclo de vida. Percebe-se isto, principalmente, devido ao objetivo principal da pesquisa, assim como à localização das fábricas de cada componente do painel. Deste modo, enfatiza-se a facilidade de acesso a dados e informações de empresas nacionais, e a dificuldade de precisão dos dados estimados referentes a processos produtivos realizados em outros países - no caso dessa pesquisa, China e Alemanha.

A partir do resultado específico desta pesquisa, pôde-se perceber que, de modo geral, a variação de impacto ambiental entre painéis fotovoltaicos importados e de produção nacional, está diretamente atrelada aos transportes internacionais, fontes de energia e processos produtivos específicos de cada país. No caso específico desta pesquisa, quando produzidos na China, tendem a causar maiores impactos, principalmente, devido ao consumo de energia regional, onde a principal fonte de energia é o carvão, ou seja, fonte de maior impacto ambiental do que as fontes predominantes no Brasil.

Como já demonstrado por autores como Pupin (2019), Oliveira, Rodrigues e Luz (2018), a produção do painel em si é a etapa de maior impacto em casos brasileiros. Apresentando resultado compatível com o encontrado nesta pesquisa.

Neste estudo, pôde-se perceber que a produção do painel fotovoltaico, e mais especificamente, da célula fotovoltaica, é o fator que causa os maiores impactos ambientais do sistema. De modo ainda mais contrastante, os processos referentes à gestão do fim de vida não aparecem entre os cinco processos mais impactantes em nenhuma das categorias e em nenhum dos cenários. Ou seja, a produção do sistema causa impactos ambientais muito maiores do que sua gestão de fim de vida.

Para que fosse possível a análise por meio do *software* OpenLCA, foram feitas algumas adaptações quanto à inclusão de processos referentes ao ciclo de vida específico do estudo de caso, devido à disponibilidade da base de dados e também ao acesso aos dados referentes aos processos produtivos. Assim, ainda que exista certa fragilidade quanto à totalidade dos dados referentes aos processos produtivos do painel fotovoltaico importado na China, pôde-se contar com informações da base de dados, que permitiram respostas relativamente confiáveis, por resultarem em valores próximos às estimativas elaboradas.

Pode-se perceber que uma importante característica deste trabalho quanto ao ineditismo é a utilização do *software* OpenLCA. Afinal, dos estudos utilizados como referência, nenhum deles faz uso de *softwares* abertos. Ao se utilizar do OpenLCA como ferramenta para a elaboração da ACV, promove-se a acessibilidade a esse recurso por uma maior parte do público interessado na gestão do ciclo de vida. Não somente devido ao acesso gratuito, mas também pela atualidade das bases de dados atualizadas disponibilizadas no *website* do programa, permitido o acesso a simulações e resultados confiáveis. Ainda que para a elaboração da ACV nesta pesquisa, tenha sido solicitada formalmente à Ecoinvent uma base de dados para fins acadêmicos, considera-se que dados abertos também permitiriam resultados válidos.

Acerca de possíveis incertezas ou imprecisões de ordem de modelagem do sistema, evidencia-se o poder de escolha do profissional responsável pela elaboração da ACV. Dá-se destaque a tal situação, pois qualquer elemento que subsidia a ACV é resultado de critérios de escolha.

Quanto ao detalhamento da modelagem, percebe-se que toda ACV possui espaço para aperfeiçoamento. No exemplo deste estudo de caso, o processo produtivo do painel fotovoltaico foi detalhado nos Cenários 3 e 4 a partir de elementos que já

havia passado por processos de manufatura, ou seja, havia espaço para maiores detalhamentos dos processos de extração das matérias-primas, ou ainda, da produção da infraestrutura que fundamenta esses processos, entre outros elementos. Graças a complexidade da base de dados acessada, pôde-se abreviar tais etapas.

Pode-se considerar que uma das principais contribuições para gestão de fim de vida desse sistema seja a busca por novos modelos de sistema de geração e energia solar, de modo que sejam mais eficientes e duradouros, com maior período de vida útil, e projetados para a gestão de fim de vida de modo mais prático e eficiente, menos poluente e para a reciclagem. Para que isso seja possível, acredita-se que a resposta está no trabalho dos projetistas dos sistemas e desenvolvedores de tecnologias, designers de produtos e engenheiros químicos, eletricitas, mecânicos e de produção.

Afinal, já se sabe que o processo produtivo é o que causa o maior impacto, então, resta buscar alternativas que aumentem a durabilidade e a eficiência do sistema, a fim de garantir seu funcionamento por mais tempo, evitando sua substituição por um produto novo, causando tal impacto novamente.

Quanto ao campo de arquitetura, percebe-se que a ACV pode associar-se de modo direto a qualquer produto relativo à construção civil. Porém, a relação direta com o projeto arquitetônico como um todo, ainda se encontra em situação pouco nítida, o que demanda mais estudos relacionados a interação dos temas, aos *plug-ins* para *softwares* de projeto, e às análises de compatibilização e integração de projetos. Considerando a identificação de tal lacuna de pesquisa, pretende-se dar segmento a este estudo, vinculando a aplicabilidade do método ao projeto arquitetônico como um todo, e à relação das categorias de impacto ambiental com o setor de construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. São Paulo, 200p. 2010. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2010/>. Acesso em: 11 jun. 2019.
- ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Edição Especial 15 anos. ISSN 2179-8303. São Paulo, 73p. 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>. Acesso em: 29 maio 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº482**. 17 abr. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687**. 24 nov. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2019.
- AMARAKOON, Shanika *et al.* Life cycle assessment of photovoltaic manufacturing consortium (PVMC) copper indium gallium (di)selenide (CIGS) modules. **International Journal of Life Cycle Assessment**, p.851-866, 2018.
- ARYAN, Venkat; FONT-BRUCART, Mercè; MAGA, Daniel. A comparative life cycle assessment of end-of life treatment pathways for photovoltaic backsheets. **Progress in Photovoltaics**, v. 26, p. 443-459, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**: Infográfico ABSOLAR. 1º out. 2020. n. 24. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>. Acesso em: 5 nov. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040/2009**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Versão Corrigida: 21.07.2014. Rio de Janeiro, 2014. 22p.
- AZEUMO, Maurianne Flore *et al.* Photovoltaic module recycling, a physical and chemical recovery process. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 193, p.314-319, 2019.
- BELLINI, Emiliano. Os preços dos sistemas fotovoltaicos caíram 8% no Brasil no primeiro semestre do ano. **pv magazine**, 14 ago. 2019. Disponível em: <https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/os-precos-dos-sistemas-fotovoltaicos-cairam-8-no-brasil-no-primeiro-semester-do-ano/>. Acesso em: 16 ago. 2019.

BERAWI, Mohammed Ali *et al.* **Increasing energy efficiency by considering building's life cycle**. 2018. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

BEZERRA, Jordy Lustosa; LIRA, Marcos Antônio Tavares; SILVA, Elaine Aparecida da. Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. Universidade Federal do Piauí. *In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 2018, Gramado, RS. **Anais** [...]. Gramado, RS, 2018, não paginado. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens>. Acesso em: 30 jun. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605 de 1998; e dá outras providências. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para assuntos jurídicos. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 jun. 2019.

BRASIL. **Acordo Setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. Ministério do Meio Ambiente. 31 p., out. 2019a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/15652-minist%C3%A9rio-do-meio-ambiente-celebra-acordo-setorial-de-eletroeletr%C3%B4nicos.html>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional: Relatório Final / Ano Base 2018**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. 2019b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.

BRASIL. **Boletins 2019**: dezembro. Ministério de Minas e Energia. Boletins de Monitoramento do Sistema Elétrico. 2019c. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019>. Acesso em: 27 fev. 2020.

BRASIL. **Matriz Energética e Elétrica**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa energética (EPE). 2020. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 9 mar. 2020.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CONSTANTINO, Gabriel *et al.* Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts. **Energies**, v. 11, n. 2806, 28 p., 2018.

CEMIG. **Usina solar do Mineirão completa 5 anos**. 17 maio 2018. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/Paginas/Usina-Solar-do-Mineir%C3%A3o-completa-5-anos.aspx>. Acesso em: 14 mar. 2020.

CORCELLI, F. *et al.* Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean: An Lca comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation. **Resources, conservation & Recycling**, v. 144, p. 321-336, 2019.

DENG, Rong *et al.* A Techno-economic review of silicone module recycling. Renewable and Sustainable. **Energy Reviews**, v. 109, p. 532-550, 2019.

DESCARTE LEGAL. **Encontre empresas licenciadas para descartar seus resíduos**. 2017. Disponível em: descartelegal.com. Acesso em 12 jun. 2019.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos** (Painéis Solares). Orientador: Hugo Marcelo Veit. 2015. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DUFLOU, Joost *et al.* Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery CIRP Annals. **Manufacturing Technology**, v. 67, p. 29-32, 2018.

ECOINVENT. **Support: FAQs**. 2020a. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/support/faqs/faqs.html>. Acesso em: 12 jun. 2020.

ECOINVENT. **About Ecoinvent**. 2020b. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>. Acesso em: 29 set. 2020.

ESKEW, John *et al.* An environmental Life Cycle Assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand. Elsevier, **Renewable Energy**, v. 123, p. 781-792, 2018.

ESTADÃO. **Energia solar cresce 407% em um ano no Brasil impulsionada por painéis em residências**. Economia & Negócios. 13 abr. 2018. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/energia-solar-cresce-407-em-um-ano-no-brasil-impulsionada-por-paineis-em-residencias/>. Acesso em: 24 set. 2018.

FAIRCLOTH, Cameron *et al.* The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 143, p. 260-272, 2019.

FREIRE, Felipe. **Destrinchando a placa solar fotovoltaica**. Share Energy: energia solar ao alcance de todos. 12 nov. 2017. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/destrinchando-placa-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 18 ago. 2019.

GOMES, Luciana Paulo *et al.* Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 20, n. 3, p.449-462, 2015. Disponível em:

<http://www.scielo.br/pdf/esa/v20n3/1413-4152-esa-20-03-00449.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2019.

GOMES, Leonardo Geraldo de Oliveira; PEREIRA, Andrea Franco. Identificação de pontos de controle no ciclo de desenvolvimento de produto por meio de modelagem conceitual e mapeamento da informação. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 2, p. 257-269, 2014. ISSN 0104-530X. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2014000200004&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 22 jul. 2020.

GUIMARÃES, Gabriela Dias. **Incertezas de cenário no inventário de avaliação de ciclo de vida de edificações**. Orientador: Vanessa Gomes da Silva. 122 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

HEYWOOD, Huw. **101 regras básicas para edifícios e cidades sustentáveis**. São Paulo: Editorial Gustavo Gili, 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 273-280, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Avaliação do Ciclo de Vida: Ontologia Terminológica**. Brasília, 72p., 2015. ISBN: 978-85-7013-103-4.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Data and Statistics**. Energy Supply - Electricity generation by source – World, China, Brazil. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Electricity%20generation%20by%20source>. Acesso em: 8 out. 2020.

KEELER, Marian. BURKE, Bill. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

KOO, Choongwan; HONG, Taehoon; PARK, Joonho. Development of the life-cycle economic and environmental assessment model for establishing the optimal implementation strategy of the rooftop photovoltaic system. **Technological and economic development of economy**, v. 24, n. 1, p. 27-47, 2018.

LI, Tianqi; ROSKILLY, Anthony Paul; WANG, Yaodong. Life Cycle Sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. **Applied Energy**, v. 227, p. 465-479, 2018.

LIU, Da *et al.* Contribution of international photovoltaic trade to global greenhouse gas emission reduction: the example of China. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 143, p. 114-118, 2019.

- LUDIN, Norasikin Ahmad *et al.* Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable energy Reviews**, v. 96, p. 11-28, 2018.
- LUNARDI, Marina M. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. **Applied Sciences**, v. 8, n. 1396, 15 p., 2018.
- LUO, Wei *et al.* A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 174, p. 157-162, 2018.
- MACHADO, Gleysson Bezerra. **Aterro Sanitário**. Portal Resíduos Sólidos. 18 jun. 2013. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/aterro-sanitario/>. Acesso em 9 jun. 2019.
- MAGDESIAN, Isabella Matinho Eid. A proposta de mudança da norma de geração de energia distribuída. **Estadão: Política**. 21 fev. 2020. Disponível em: <https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/a-proposta-de-mudanca-da-norma-de-geracao-distribuida-de-energia/#:~:text=Minigera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADda%20%C3%A9%20aquela%20com,ou%20igual%20a%20cinco%20megawatts.&text=Desde%20a%20regulamenta%C3%A7%C3%A3o%2C%20segu%20ndo%20a,totalizando%20mais%20de%201.300%20megawatts..> Acesso em: 2 jun. 2020.
- MAHMOUDI, Sajjad *et al.* End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literatura review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p.1-6, 2019.
- MAHMOUDI, Sajjad; HUDA, Nazmul; BEHNIA, Masud. Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p. 192-205, 2019.
- MAHMUD, Parvez *et al.* Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Lyfe Cycle Assessment. **Energies**, v. 11, n. 2346, 21p., 2018.
- MARINE TRAFFIC. **Voyage Planner**. 2020. Disponível em: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:38.1/centery:16.6/zoom:3>. Acesso em: 28 maio 2020.
- MASOUMIAN, Mahsa; KOPACEK, Peter. End-of-Life Management of Photovoltaic Modules. **IFAC-PapersOnLine**, p.162-167. 2015. International Federation Automatic Control.
- MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p.160-175, 2016.

MINAS ARENA. **Sustentabilidade**: Usina Solar Fotovoltaica. 2016. Disponível em: <http://estadiomineirao.com.br/o-mineirao/imprensa/sustentabilidade/>. Acesso em 14 mar. 2020.

MIRANDA, Rosana Teixeira. **Análise de gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos, utilizando o estudo de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para comparar impactos de duas estratégias de fim de vida**. Orientadora: Regina Manbeli Barros. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

MUTEL, Chris. **Ecoinvent Geography Definitions**. 2014. Ecoinvent-geo 2.0 Documentation. Disponível em: <https://geography.ecoinvent.org/>. Acesso em: 12 jun. 2020.

NEVALA, Sanna-Mari *et al.* Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. **Waste Management**, v. 87, p. 43-50, 2019.

NUNBERG, Sarah; ECKLEMAN, Matthew. **Long term thinking for conservation planning**. 2017. Managing Collection Environments: Preserving Collections in the Age of Sustainability. Pennsylvania Academy of the Fine Arts, Philadelphia.

OLIVEIRA, Adriana de Souza; RODRIGUES, Thiago Oliveira; LUZ, Sandra Maria da. Avaliação do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico: efeitos da logística e da matriz energética da produção na China e no Brasil. *In*: VI CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, 2018, p. 301-306.

OLIVEIRA, André Freitas; TRIGOSO, Federico Bernardino Morante; GASI, Fernando. Eficiência do ciclo de vida energético dos módulos fotovoltaicos no contexto brasileiro. Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação em Energia. *In*: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado, RS. **Anais [...]**. Gramado, RS, 2018, não paginado. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens>. Acesso em: 30 jun. 2019.

OPENLCA. **Basic Modeling in OpenLCA - Plastic Bottle**. 10 abr. 2019. Disponível em: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/10/GreenDelta-Bottle-Tutorial.pdf>. Acesso em: 19 maio 2020.

OPENLCA NEXUS. **Ecoinvent 3.5 LCIA methods**. 2020a. Databases. Free databases. Downloads. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/downloads>. Acesso em: 26 maio 2020.

OPENLCA. **About: the idea**. Greendelta. 2020b. Disponível em: <https://www.openlca.org/the-idea/>. Acesso em: 29 set. 2020.

OUR WORLD IN DATA. **Installed solar energy capacity, 2019**: cumulative installed solar capacity, measured in gigawatts (GW). 2020. Disponível em:

<https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity?tab=map&time=2019>. Acesso em: 8 out. 2020.

PADOAN, Flavia C. S. M.; ALTIMARI, Pietro; PAGNANELLI, Francesca. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. **Solar Energy**, v. 177, p. 746-761, 2019.

PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **DIRETIVA 2012/19/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO**: relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (reformulação). 4 jul. 2012. Jornal Oficial da União Europeia. p. 38-71. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>. Acesso em: 11 jun. 2019.

PEREIRA, Andrea Franco. Avaliação do Ciclo de Vida no ambiente construído: importância da modelagem do inventário do ciclo de vida para projeto de produto e arquitetônico. In: RESENDE, M. A. P. (Org). **Tecnologia do Ambiente Construído e Interdisciplinaridade**. 1ed. Belo Horizonte: Instituto de Estudos do Desenvolvimento Sustentável, 2012. ISBN 978-85-62372-14-8.

PESTALOZZI, Fadri; EISERT, Stefan; WOIDASKY, Jörg. Benchmark Comparison of High Voltage Discharge Separation of Photovoltaic Modules by Electrohydraulic and Electrodynamical Fragmentation. **Recycling**, v. 3, n. 13, 12p., 2018.

PORTAL SOLAR. **Célula Fotovoltaica**. 2019a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em 10 set. 2019.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Pannel Solar**. 2019b. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>. Acesso em: 25 jun. 2019.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Pannel Solar Fotovoltaico**. 2019c. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-pannel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 10 set. 2019.

PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. Orientadora: Denise Croce Romano Espinosa. 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Plitécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PUPIN, Priscila Carvalho. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise do ciclo de vida**. Orientador: Roberto Akira Yamachita. Coorientador: Jamil Haddad. 2019. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

PV CYCLE. **About PV Cycle**. 2016. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/organisation/about/>. Acesso em: 24 jun. 2019.

QUIVY, Raymond; CAMPENHOUDT, LucVan. **Manual de investigação em ciências sociais**. Tradução: João Minhoto Marques, Maria Amália Mendes e Maria Carvalho. 4. ed. Lisboa, Gradiva, 2005.

RAHMAN, Mustafizur; ALAM, Chowdhury Sadid; AHSAN, Abir. A Life Cycle Assessment Model for Quantification of Environmental Footprints of a 3.6kWp Photovoltaic System in Bangladesh. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 8, n. 2, p. 113-118, 2019.

RAJPUD, Pramod *et al.* Life Cycle assessment of the 3.2 kW cadmium telluride (CdTe) photovoltaic system in composite climate of India. **Solar Energy**, v. 159, p. 415-422, 2018.

ROOS, Cristiano; BEUREN, Fernanda Hansch; BARBOSA, Samuel Borges. **Product-Service System e Design for Upgrade**: Contribuições para a Sustentabilidade Ambiental. 8ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa: Educação e Sustentabilidade. Revista Congrega URCAMP, p.44-69, 2010.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SIERRA-PÉREZ, Jorge. *et al.* Integrated life cycle assessment and thermodynamic simulation of a public building's envelope renovation: Conventional vs. Passivhaus proposal. Centro Universitario de la Defensa. Zaragoza, Espanha. **Applied Energy Journal**. v. 212, p. 1510–1521, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191731824X?via%3Dihub>. Acesso em: 3 maio 2018.

SOLAR BRASIL TECNOLOGIA E ENERGIA FOTOVOLTAICA LTDA. **AS6P – Módulo Solar Policristalino**: catálogo. AmeriSolar – New Energy New World. São Paulo.

SONNEN ESTRUTURAS. **Catálogo 2020**. Santa Maria. 2020.

SOULIOTIS, Manolis *et al.* Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications. Elsevier, **Renewable Energy**, v. 126, p. 708-723, 2018.

SMA SOLAR TECHNOLOGY. **Sunny Tripower 60**: catálogo.

TANNOUS, Scarlett *et al.* Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of traditional grid-connected and solar stand-alone street light systems: A case study for rural areas in Lebanon. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 963-977, 2018.

XIE, Minghui *et al.* Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, n. 184, p.648-659, 2018.

XU, Liang *et al.* Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011-2016: A life cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 310-329, 2018.

YANG, H. L. *et al.* Recycling and reuse of kerf-loss silicon from diamond wire sawing for photovoltaic industry. **Waste Management**, v. 84, p. 204-210, 2019.

ZHANG, Tiantian; WANG, Meng; YANG, Hongxing. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. **Energies**, v. 11, n. 3157, 34 p., 2018.

ZHANG, Yu *et al.* The microstructure evolution and mechanical properties of MgO-C refractories with recycling Si/SiC solid waste from photovoltaic industry. **Ceramics International**, v. 44, p. 16435-16442, 2018.

APÊNDICE A – DADOS EMPRESA SONNEN ENERGIA

Avaliação do Ciclo de Vida de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil

Dissertação de Mestrado – PPG ACPS UFMG

Mestranda: Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen

Orientadora: Andrea Franco Pereira

SONNEN ENERGIA

Colaborador Sonnen: Ronaldo

ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) é um método de análise de impacto ambiental de sistemas, produtos e projetos, orientada pela NBR ISO 14040.

De modo geral, uma ACV é elaborada em fases finais de projetos de produtos, a fim de identificar os impactos ambientais causados pelas diversas etapas do ciclo de vida de um produto, fundamentando melhorias nos cenários de impacto ambiental.

Sabe-se que quanto maior a instalação, menor o impacto ambiental causado por ela, por otimizar processos de logística e transporte. Sendo assim, há especial interesse em alguma das instalações de maiores proporções, se possível, instalada em cobertura de edificação. Por isso, busca-se com a Sonnen, um exemplo concreto que conte com tal disponibilidade de dados.

Nesta pesquisa, a ACV será elaborada por meio do *software* OpenLCA, o qual, demanda alguns dados de entrada, tais como:

INFORMAÇÕES GERAIS DA INSTALAÇÃO:

Localização da instalação do sistema (cidade, e se possível, endereço)	Rua João Cafarate , Uruguaiana, RS
Data da instalação	2020
Marca dos painéis	AmeriSolar
Local da fábrica (país, cidade, endereço)	China, Província de Jiangsu, Cidade de Rugao, Rua Qifeng, nº 88. http://www.weamerisolar.com/english/contact/

Transporte Importação China-Brasil	China-Brasil: Navio Paranaquá-Uruguaiana: caminhão
Quantos painéis por container no navio? (catálogo AmeriSolar)	20 pés: 260 peças 40 pés: 616 peças
Embalagem (catálogo AmeriSolar)	26 peças por palete
Distribuidor (módulos e inversor)	Mazer
Modelo dos painéis	AS-6P (72 células)
Modelo célula	Silício Plicristalino 156x156mm
Quantidade de painéis (unidade)	228 módulos
Dimensões do painel (mm)	1956 x 992 x 40 mm
Dimensão geral da instalação	+/- 450 m ²
Peso individual dos painéis	22,5 kg (catálogo AmeriSolar)
Inclinação e orientação	Norte, varia 25° até 10° em média
Tipo de cobertura	Telhado autoportante

SOBRE A ESTRUTURA SOLARFIX:

Modelo Estrutura SolarFix	Estrutura especial feita sob medida, utilizando perfil para telhado B08 e fixação com auto brocante
Do que é composta a estrutura? Alumínio? Quais outras matérias-primas?	Alumínio
Fornecedor Perfis	Alumind
Quantidade de material estimada	462 kg
Consumo de energia mensal da Sonnen	1300 kWh
Processos realizados pela Sonnen	Corte e furação
Transporte Santa Maria - Uruguaiana	Van máster. 3 viagens.

SOBRE O INVERSOR:

Marca	SMA
Nacional ou Importado	Importado
Modelo	STP 60-10
Localização da fábrica	Alemanha
Transporte Fábrica-Instalação	Navio, Caminhão, Van Master
Informações adicionais acerca da logística de transporte	Geralmente entregue em nossa empresa para ser transportada via caminhão ou van dependendo do tamanho do sistema. Este foi um caso especial entregue diretamente no local da instalação.

Grata pela atenção e disponibilidade,
Bárbara Dalla Vechia, mestrande PPG ACPS UFMG
barbaradvk@gmail.com
(55) 99959 0502

APÊNDICE B – CARTA DE INTERESSE – SONNEN ENERGIA

Santa Maria, 17 de agosto de 2020.

Profa. Dra. Andréa Franco Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Arquitetura

Laboratório de Estudos Integrados em Arquitetura, Design e Estruturas

Prezada Professora,

De acordo com nossas conversas, gostaríamos de registrar nosso interesse pela pesquisa que vem sendo desenvolvida pela estudante de mestrado Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen, sob sua orientação, junto ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.

Acreditamos que o estudo que vem sendo realizado por vocês, ligado à aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida na instalação de sistemas de geração de energia renovável em edificações, será de grande valor para nós que atuamos na instalação de painéis solares.

Sendo assim, nos colocamos à disposição para fornecer informações que considerem pertinentes, confiantes de que os resultados obtidos na pesquisa tragam aplicação direta para a nossa empresa, sobretudo, no que se refere a uma melhor compreensão quanto às implicações ambientais do produto em seu ciclo de vida.


Renan Reiter
Diretor Técnico
Sonnen Energia LTDA



APÊNDICE C – RELATÓRIO RESULTADO DO OPENLCA

20/10/2020

Report

Results of project: ACV PV

Introduction

In the following the results of the project are shown. This is a default template for the report of the project results. You can configure this template via the project editor by

- changing the text of the sections,
- adding or removing sections,
- moving sections around,
- and selecting visual components that should be shown.

Note that you can also use HTML elements to format the section texts. Additionally, you can export this report as an HTML page using the export button in the toolbar of the report view.

Project Variants

This table shows the name and description of the variants as defined in the project setup. The variant names of the project setup are used for all charts and tables of the other report components.

Option	Description
Cenário 1	Produção do painel por base de dados e fim de vida em Aterro.
Cenário 2	Produção do painel por base de dados e fim de vida em Incineração.
Cenário 3	Produção do painel por estimativas e fim de vida em Aterro.
Cenário 4	Produção do painel por estimativas e fim de vida em Incineração.

Selected LCIA Categories

The table below shows the LCIA categories of the selected LCIA method of the project. Only the LCIA categories that are selected to be displayed are shown in the report. Additionally, a user friendly name and a description for the report can be provided.

Impact category	Unit	Description
climate change (climate change biogenic)	kg CO2-Eq	
climate change (climate change fossil)	kg CO2-Eq	
climate change (climate change land use and land use change)	kg CO2-Eq	
climate change (climate change total)	kg CO2-Eq	
ecosystem quality (freshwater and terrestrial acidification)	mol H+-Eq	
ecosystem quality (freshwater ecotoxicity)	CTU	

20/10/2020

Report

Impact category	Unit	Description
ecosystem quality (freshwater eutrophication)	kg P-Eq	
ecosystem quality (marine eutrophication)	kg N-Eq	
ecosystem quality (terrestrial eutrophication)	mol N-Eq	
human health (carcinogenic effects)	CTUh	
human health (ionising radiation)	kg U235-Eq	
human health (non-carcinogenic effects)	CTUh	
human health (ozone layer depletion)	kg CFC-11-Eq	
human health (photochemical ozone creation)	kg NMVOC-Eq	
human health (respiratory effects, inorganics)	disease incidence	
resources (dissipated water)	m3 water-Eq	
resources (fossils)	MJ	
resources (land use)	points	
resources (minerals and metals)	kg Sb-Eq	

LCIA Results

This table shows the LCIA results of the project variants. Each selected LCIA category is displayed in the rows and the project variants in the columns. The unit is the unit of the LCIA category as defined in the LCIA method.

Impact category	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Unit
climate change (climate change biogenic)	7.49363e+2	7.49799e+2	7.35934e+2	7.36370e+2	kg CO2-Eq
climate change (climate change fossil)	1.04244e+5	1.07712e+5	1.18962e+5	1.22430e+5	kg CO2-Eq
climate change (climate change land use and land use change)	3.14730e+2	3.15042e+2	3.07314e+2	3.07626e+2	kg CO2-Eq
climate change (climate change total)	1.05308e+5	1.08777e+5	1.20005e+5	1.23474e+5	kg CO2-Eq
ecosystem quality (freshwater and terrestrial acidification)	6.55263e+2	6.78330e+2	7.66689e+2	7.89756e+2	mol H+-Eq
ecosystem quality (freshwater ecotoxicity)	1.06608e+5	1.07389e+5	1.14091e+5	1.14872e+5	CTU

20/10/2020

Report

Impact category	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Unit
ecosystem quality (freshwater eutrophication)	5.30409e+1	5.31123e+1	6.21278e+1	6.21992e+1	kg P-Eq
ecosystem quality (marine eutrophication)	1.39421e+2	1.48761e+2	1.55428e+2	1.64767e+2	kg N-Eq
ecosystem quality (terrestrial eutrophication)	1.30932e+3	1.41224e+3	1.47498e+3	1.57790e+3	mol N-Eq
human health (carcinogenic effects)	2.65148e-3	2.66113e-3	2.87617e-3	2.88583e-3	CTUh
human health (ionising radiation)	9.65286e+3	9.86502e+3	1.01947e+4	1.04068e+4	kg U235-Eq
human health (non-carcinogenic effects)	2.76839e-2	2.78821e-2	3.28853e-2	3.30835e-2	CTUh
human health (ozone layer depletion)	1.21640e-2	1.29205e-2	1.28550e-2	1.36115e-2	kg CFC-11-Eq
human health (photochemical ozone creation)	4.45091e+2	4.80797e+2	4.97305e+2	5.33010e+2	kg NMVOC-Eq
human health (respiratory effects, inorganics)	6.61456e-3	7.09002e-3	6.60411e-3	7.07957e-3	disease incidence
resources (dissipated water)	1.68379e+5	1.68545e+5	1.80128e+5	1.80294e+5	m ³ water-Eq
resources (fossils)	1.56354e+6	1.61029e+6	1.74703e+6	1.79378e+6	MJ
resources (land use)	7.27304e+5	7.31980e+5	7.28820e+5	7.33496e+5	points
resources (minerals and metals)	5.02946e-4	5.03384e-4	1.78022e-4	1.78460e-4	kg Sb-Eq

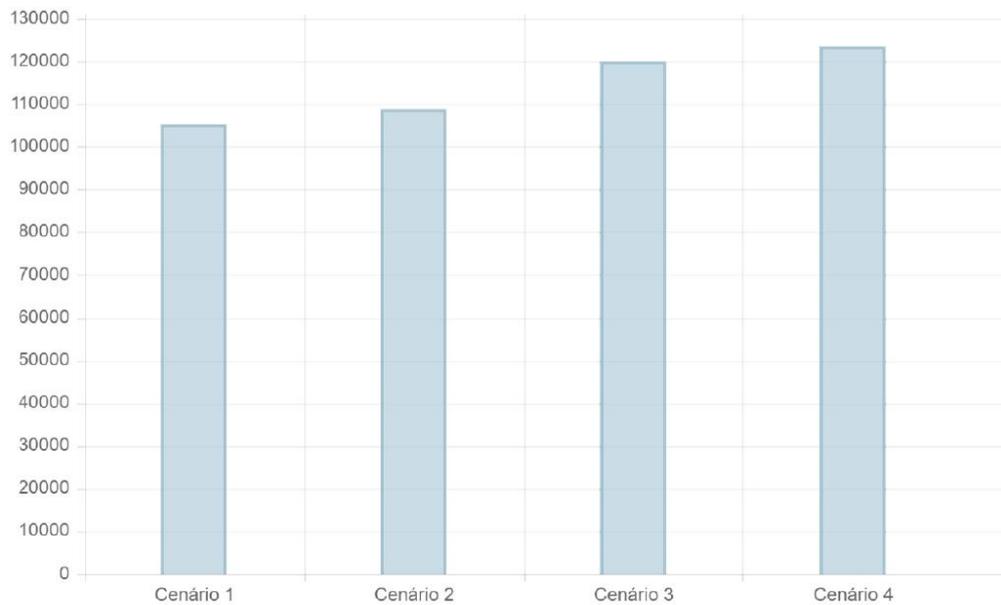
Single Indicator Results

The following chart shows the single results of each project variant for the selected indicator. You can change the selection and the chart is dynamically updated.

20/10/2020

Report

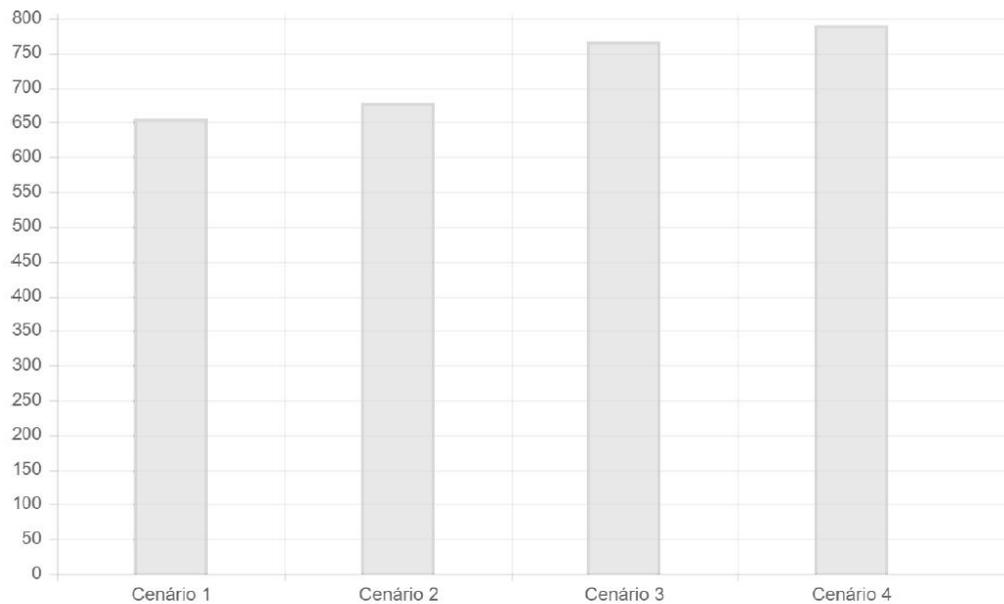
climate change (climate change total) ▼



Process Contributions

This chart shows the contributions of the selected processes in the project setup to the variant results of the selected LCIA category. As for the single indicator results, you can change the selection and the chart is dynamically updated.

ecosystem quality (freshwater and terrestrial ac) ▼



Relative Results

The following chart shows the relative indicator results of the respective project variants. For each indicator, the maximum result is set to 100% and the results of the other variants are displayed in relation to this result.

